



**Aalto-yliopisto**  
Kemian tekniikan  
korkeakoulu

**Kemian tekniikan korkeakoulu**  
**Puunjalostustekniikan koulutusohjelma**

**Tatu Waltari**

**Puusandwich- ja moduulirakenteen optimointi tilaelementteihin**

**Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 6.9.2016.**

**Valvoja**

**Professori Lauri Rautkari**

**Ohjaaja**

**MMT Maija Kymäläinen**

---

**Tekijä** Tatu Waltari

---

**Työn nimi** Puusandwich- ja moduulirakenteen optimointi tilaelementteihin

---

**Laitos** Puunjalostustekniikan laitos

---

**Professori** Puutuotetekniikka

---

**Professuurikoodi** Puu-28

---

**Työn valvoja** Prof. Lauri Rautkari

---

**Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t)** MMT Maija Kymäläinen

---

**Päivämäärä** 06.09.2016

---

**Sivumäärä** 51+7

---

**Kieli** Suomi

---

## Tiivistelmä

Tilaelementtejä voidaan käyttää erilaisissa tapahtumissa, kuten messuilla, tilapäisinä toimisto- tai varastotiloina. Tilapäisten tilaelementtien tulee olla helposti liikuteltavissa, joten ne kootaan erillisistä moduuleista. Moduulien rakenteelta toivotaan keveyttä ja kestävyyttä. Rakenteessa käytettyjen materiaalien halutaan myös noudattavan kestävä kehitystä. Näiden lisäksi tilaelementiltä toivotaan esteettisyyttä. Puusandwich-rakenne täyttää nämä ehdot.

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia sopivaa puupohjaista sandwich-rakennetta, joka täyttäisi edellä mainitut ehdot. Sandwich-rakenne on yksinkertaisimmillaan rakennettu kahdesta pintalevystä ja yhdestä eristelevystä. Pintalevyt voivat olla puulevyjä, jotka tuovat rakenteelle tarvittavaa lujuutta. Eristelevy voi olla huomattavasti kevyempää materiaalia, joka silti tarjoaa kestävyyttä sekä eristävyyttä. Esimerkiksi hunajakennolevy täyttää nämä ehdot. Pintalevyjen ollessa puuta ja eristeen ollessa puupohjainen materiaali, rakenne noudattaa kestävä kehityksen periaatteita.

Kirjallisuusosassa tutustutaan erilaisiin materiaaleihin, joita sandwich-rakenteissa voi olla. Kokeellisessa osassa mitattiin erilaisten sandwich-rakenteiden lujuuksia ja tiheyksiä. Sandwich-rakenteita oli 9 erilaista. 8 sandwich-rakennetta oli 3-kerroksisia ja 1 rakenne oli 5-kerroksinen. Pintamateriaaleina oli koivuvaneri, havuvaneri, liimapuulevy ja OSB-levy. Eristemateriaaleina oli pahvinen hunajakennolevy ja polystyreenilevy. Lujuustesteissä mitattiin maksimivoima, kimmokerroin, taivutuslujuus sekä venymä 1000 N kohdalla. Tulosten perusteella pintamateriaaleista OSB-levyä ei voida suositella käytettäväksi tilaelementeissä. Muiden pintamateriaalien tulokset olivat hyviä. Eristemateriaaleista molemmat antoivat lupaavia tuloksia, mutta vain hunajakennolevy noudattaa kestävä kehityksen periaatteita. Näiden lisäksi havuvanerilla testattiin syysuunnan vaikutusta lujuusominaisuuksiin. Yhdensuuntainen syysuunta rakenteen pituuden kanssa todettiin parhaaksi.

---

**Avainsanat** Puu, sandwich, moduuli, tilaelementti, lujuus, tiheys

---

<b>Author</b> Tatu Waltari		
<b>Title of thesis</b> Optimizing wooden sandwich and module structure for volume elements		
<b>Department</b> Department of Forest Products Technology		
<b>Professorship</b> Wood Product Technology		<b>Code of professorship</b> Puu-28
<b>Thesis supervisor</b> Prof. Lauri Rautkari		
<b>Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s)</b> D. Sc. (Agr. & For.) Maija Kymäläinen		
<b>Date</b> 06.09.2016	<b>Number of pages</b> 51+7	<b>Language</b> Finnish

## Abstract

Volume elements can be used in different events, such as exhibitions, as temporary office or storage spaces. Temporary volume elements must be easy to move so they are assembled from separate modules. Lightness and durability are desired properties for the modules. The materials used in the structure of the modulus are supposed to follow the process of sustainable development. In addition to these the volume elements should be aesthetic as well. Structure fulfilling these conditions is a wooden sandwich structure.

Objective of this master's thesis was to study suitable wood-based sandwich structure which would fulfil the conditions mentioned before. The simplest sandwich structure is made out of two face sheets and one insulation sheet. Face sheets can be wooden sheets which gives necessary strength for the structure. Insulation sheet can be significantly lighter material which still offers durability and insulation. For example, honeycomb board fulfils these conditions. As face sheets are made out of wood and the insulation sheet is made out of wood-based material the structure itself follows the process of sustainable development.

Literature review studies different materials which could be used in sandwich structures. In the experimental part strength and densities were tested on different sandwich structures. There were 9 different sandwich structures. 8 sandwich structures were 3-layered and 1 structure was 5-layered. Face sheet materials were birch plywood, softwood plywood, glued laminated timber and OSB board. Insulation materials were honeycomb board and polystyrene board. Maximum load, modulus of elasticity, bending strength and strain at 1000 N were measured in the strength tests. Results shows that OSB cannot be recommended to be used in the volume elements. Other face sheet materials gave good results. Both insulation materials gave promising results but only honeycomb board follows the process of sustainable development. In addition, with softwood plywood the effect of grain direction on strength properties was tested. Parallel grain direction was found to be best.

<b>Keywords</b> Wood, sandwich, module, volume element, strength, density
---

## **Alkusanat**

Tämä työ tehtiin puunjalostustekniikan laitoksella Aalto-yliopistossa Hukkatila Oy:n avustuksella.

Ensimmäiseksi haluan kiittää työn valvojaa Lauri Rautkaria ja ohjaajaa Maija Kymäläistä, jotka ovat ohjanneet ja antaneet neuvoja työn edetessä. Erityiskiitokset kuuluvat Hukkatila Oy:n Jaakko Lehtoselle ja Risto Kärkkäiselle, jotka ovat koko työn aiheen ja idean takana. Haluan kiittää myös Timo Kotilahtea, joka avusti työssä tehtyjen lujuustestien tekemisessä.

Kiitos kuuluu myös perheelleni ja ystävilleni, jotka ovat antaneet tukea läpi opintojeni sekä tämän työn tekemisessä.

“Even if you fall on your face, you’re still moving forward.”

-Victor Kiam

Espoo 5.9.2016

Tatu Waltari

## Sisällysluettelo

1	JOHDANTO.....	3
1.1	Työn tausta, rajausta ja tavoitteet .....	3
1.2	Työn rakenne.....	4
2	KIRJALLISUUSOSA.....	5
2.1	Sandwich- eli kerrosrakenne.....	5
2.2	Pintamateriaalit.....	6
2.2.1	Vaneri.....	6
2.2.2	OSB-lastulevy .....	7
2.2.3	Kuitulevyt.....	8
2.2.4	Liimapuulevy .....	9
2.2.5	CLT-levy.....	10
2.3	Eristemateriaalit.....	10
2.3.1	Hunajakennopahvi.....	10
2.3.2	Muovieristeet.....	11
2.3.3	Kuitulevyt.....	12
2.3.4	Korkki .....	12
2.3.5	Muut eristeet .....	13
2.4	Sandwich-rakenteet.....	13
3	MATERIAALIT JA TUTKIMUSMENETELMÄT .....	15
3.1	Työssä käytetyt pintamateriaalit.....	15
3.1.1	Koivuvaneri .....	15
3.1.2	Havuvaneri.....	16
3.1.3	Liimapuulevy .....	17
3.1.4	OSB-lastulevy .....	17
3.2	Työssä käytetyt eristemateriaalit.....	18
3.2.1	Hunajakennolevy.....	18
3.2.2	Finnfoam .....	19
3.3	Rakenteet .....	19
3.3.1	Rakenteiden kokonaisneliöhinnat.....	22
3.4	Koejärjestelyt .....	22
3.5	Lujuusmittaukset.....	24
3.5.1	Kimmokerroin .....	24
3.5.2	Taivutuslujuus .....	25
4	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....	26
4.1	Lujuustestit.....	26
4.2	Maksimivoima .....	26
4.3	Kimmokerroin.....	28

4.4	Taivutuslujuus.....	30
4.5	Venymä.....	33
4.6	Tiheys .....	34
4.7	Koivuvaneri ja hunajakenno.....	35
4.8	Havuvaneri ja hunajakenno .....	36
4.9	OSB-levy ja hunajakenno .....	37
4.10	Liimapuulevy ja hunajakenno.....	37
4.11	Koivuvaneri ja Finnfoam .....	38
4.12	Havuvaneri ja Finnfoam .....	40
4.13	OSB-levy ja Finnfoam .....	41
4.14	Havuvaneri ja hunajakenno (kohtisuora).....	42
4.15	Monikerroksinen koivuvaneri ja hunajakenno .....	44
5	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	45
	LÄHDELUETTELO .....	49
	LIITTEET .....	52

# 1 JOHDANTO

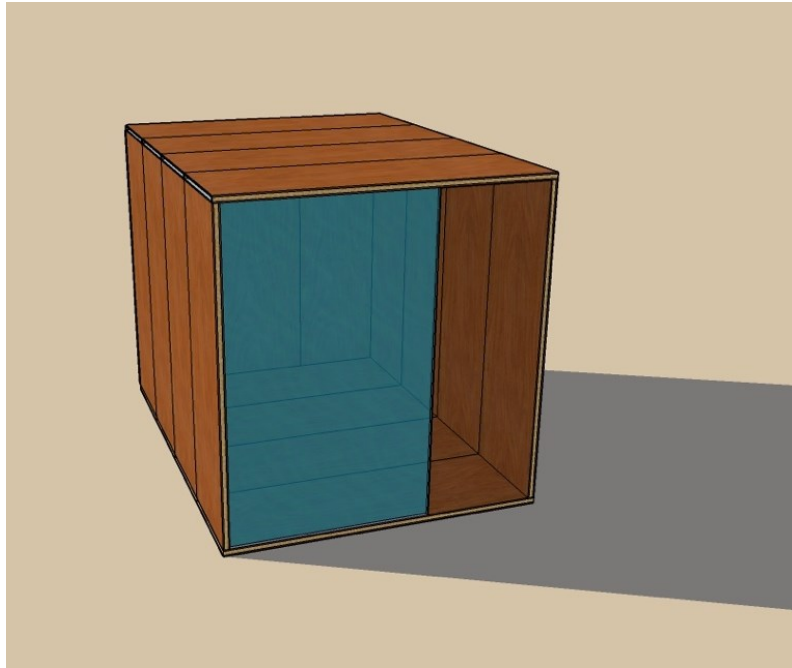
## 1.1 Työn tausta, rajausta ja tavoitteet

Tämä työ on osa Cotila-tuotekehityssuunnitelmaprojektia, jossa suunnitellaan tilaelementtejä, jotka kootaan erillisistä moduuleista. Cotila-tuotekehityssuunnitelma jakautuu kolmeen pääalueeseen, jotka ovat:

1. Puusandwich- ja moduulirakenteen optimointi tilaelementteihin
2. Elementtien liitosrakenteiden optimointi
3. Elementtien teollinen tuotanto.

Tässä työssä käsitellään näistä ensimmäistä ja se tehdään yhteistyössä Hukkatila Oy:n kanssa. Yhteen tilaelementtiin kuuluu seinä-, katto- ja lattiamoduuleita. Tilaelementit suunnitellaan tilapäisratkaisuihin esimerkiksi toimistotiloiksi erilaisiin tapahtumiin. Tilaelementteihin käytettyjen materiaalien halutaan noudattavan kestävä kehityksen periaatteita. Tämä tarkoittaa tuotteen hyvää kierrätettävyyttä ja materiaalien käyttöä uusiutuvista luonnonvaroista.

Työ rajataan sandwich-rakenteen suunnitteluun ja testaukseen. Rakenne halutaan jäykäksi ja kestäväksi, jotta se kestää käyttöä. Yksi tulevaisuuden tavoite on saada tilaelementtejä kahteen kerrokseen, joten seinämoduulin tulee kestää ylemmän elementin paino. Katto- ja lattiamoduuleilta vaaditaan jäykkyyttä, jotta virumista ei pääsisi tapahtumaan tai se olisi hyvin pientä.



*Kuva 1. Hahmotelma valmiista tilaelementistä*

## **1.2 Työn rakenne**

Työ koostuu kirjallisuusosasta, jossa käydään läpi sandwich-rakenteen ominaisuudet. Tämän lisäksi kirjallisuus osassa esitellään erilaisia pinta- ja eristemateriaaleja, sekä kerrotaan niiden rakenteesta ja ominaisuuksista.

Kokeellisessa osiossa käydään läpi käytetyt materiaalit, ja mitä erilaisia rakenteita niistä tehtiin. Tässä osiossa esitellään myös rakenteille suoritettut testit ja niiden tulokset.

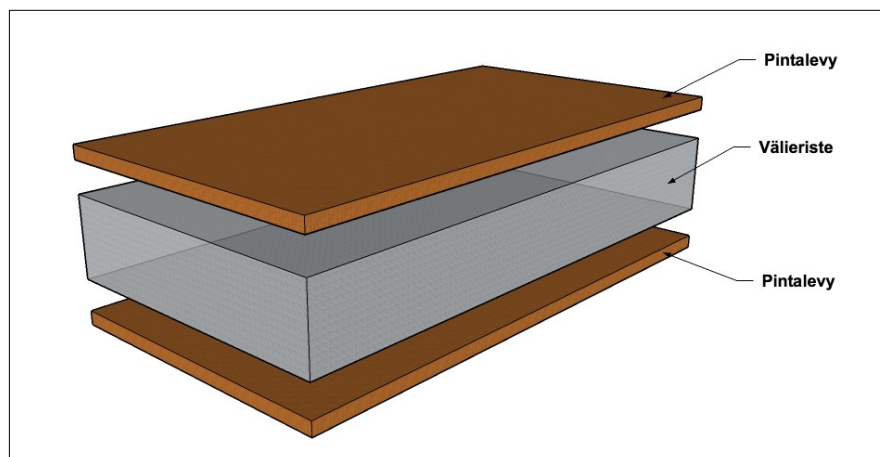
Lopuksi eri rakenteiden tuloksia vertaillaan ja tehdään johtopäätökset niiden käyttömahdollisuuksista. Tämän jälkeen työn tekijä antaa omat suosituksensa rakenteiden käytöstä.



## 2 KIRJALLISUUSOSA

### 2.1 Sandwich- eli kerrosrakenne

Sandwich-rakenne on komposiitti, joka koostuu yksinkertaisimmillaan kahdesta pintalevystä ja kevyestä ydinosasta. Pintalevyt ovat useimmiten lujia ja ohuita kun taas ydinosa on paksumpi ja kevyempi. Vaikka ydinosa on paksua ja kevyttä materiaalia, siltä toivotaan hyvää puristuslujuutta. Erikseen pintalevy ja eristemateriaali harvemmin antavat tarvittavia lujuusominaisuuksia ilman että rakenteesta tulee raskas. Yhdessä nämä kuitenkin muodostavat jäykän ja lujan rakenteen, joka on samaan aikaan suhteellisen kevyt. Sandwich-rakenne on havainnollistettu kuvassa 2.



*Kuva 2. Esimerkki sandwich-rakenteesta, jossa on 2 pintalevyä ja väliriste*

Pintalevyn ja eristeen lisäksi rakenteeseen kuuluu liima, jolla pinta- ja eristemateriaali saadaan liitetyksi toisiinsa.

He et al. (2008) tutkivat sandwich-rakenteita, joissa väliristeenä käytettiin teräksistä hunajakennoa, ja pintalevyinä ohuita teräslevyjä. Teoriatutkimuksen perusteella parhaan taivutusjäykkyyden ja taivutuslujuuden saavuttamiseksi he suosittelevat väliristeen painoksi 50-66,7 % koko rakenteen painosta. Heidän testeissään pintalevyt olivat 0,6 mm paksuja, ja väliristeen paksuus 3 mm, niin että koko rakenteen paksuus oli 4,2 mm. Väliristeen paino oli 52,4 % koko rakenteen painosta.

Kyseisellä rakenteella testeissä saadut lujuusominaisuudet olivat erittäin lähellä teoreettisia lujuusominaisuuksia. (He et al. 2008)

## **2.2 Pintamateriaalit**

Pintamateriaalin paksuudella on vaikutusta sandwich-rakenteen lujuusominaisuuksiin. Shalbafan et al. (2012) testasivat kuinka 3 eri paksuista pintalevyä vaikuttavat sandwich-rakenteen taivutuslujuuteen. Pintalevyjen paksuudet olivat 3, 4 ja 5 mm, ja jokaisen sandwich-rakenteen kokonaispaksuus oli 19 mm. Pintalevyt olivat lastulevyä, ja eriste oli polystyreenistä valmistettu EPS-levy. Testi osoitti taivutuslujuuden kasvavan pintalevyn paksuuden kasvaessa. Pintalevyn ollessa 3 mm paksu oli taivutuslujuus 8,3 MPa, ja 10,9 MPa pintalevyn ollessa 5 mm paksu. (Shalbafan et al. 2012). Pintalevyllä ja sen paksuudella on suuri rooli rakenteen lujuusominaisuuksiin, mutta tärkeää on myös rakenteen materiaalien painon suhde, kuten edellisessä kappaleessa on mainittu.

### **2.2.1 Vaneri**

Vaneri on puulevy, joka on tehty vähintään kolmesta ristiin liimatusta viilusta. Suomessa vaneria valmistetaan havupuusta sekä koivusta joko sekaisin tai erikseen. Koivuvaneri on vanereista lujuusominaisuuksiltaan parasta, mutta myös kalleinta. Havuvaneri on heikompa ja kevyempää kuin koivuvaneri. Vaneria voidaan valmistaa myös sekavanerina, jolloin vaneriin tulee sekä koivuviiluja että havuviiluja. Koivuvanerissa viilut ovat ohuita yleensä 1,4 mm paksuisia, kun taas havuvanerissa viilut ovat usein hieman paksumpia. Suomessa havuvaneriin käytetään useimmiten kuusta. (Metsäteollisuus Ry, 2005)

Vanerin valmistuksessa viilut liimataan ristiin, jotta lujuusominaisuudet olisivat hyvät joka suuntaan. Useimmissa suomalaisissa vanereissa käytetään fenoliformaldehydiliimaa, joka mahdollistaa tuotteen käytön myös

kosteissa olosuhteissa. Kuvassa 3 on esimerkki Wisa-Birch koivuvanerista. (Metsäteollisuus Ry, 2005)



*Kuva 3. Wisa-birch koivuvaneri (UPM)*

### **2.2.2 OSB-lastulevy**

OSB-levy (Oriented Strand Board) on suurista lastuista liimattu useimmiten kolmikerroksinen levy, jossa pintakerrosten lastut ovat liimattu samaan suuntaan, ja välikerroksen lastut poikittain pintakerroksen lastujen syysuuntaan nähden. Lastut ovat suuria noin 10-15 senttimetriä pitkiä ja noin 15 millimetriä leveitä. Paksuudeltaan lastut ovat noin 0,7 millimetriä. (Wood Handbook, 2010, s.258)

OSB-levyn rakenne muistuttaa vaneria eri kerrosten syysuuntien ollessa poikittain toisiinsa nähden. Ristiinliimaus vähentää myös levyn kosteuselämistä ja antaa pintakerrosten lastujen suunnassa hyvän taivutuslujuuden. OSB on kuitenkin lujuusominaisuuksiltaan heikompaa kuin vaneri. OSB-levyjen valmistuksessa käytetään usein puulajeja, jotka ovat edullisia, ja jotka eivät useimmiten ole lujuusominaisuuksiltaan parhaita. Liimausvaiheessa käytetään kuitenkin kovaa painetta ja lämpöä, joiden avulla lopputuloksena on luja levy. Kuvassa 4 näemme Kronospanin OSB-levyn. (Wood Handbook, 2010, s.258)



*Kuva 4. Kronospanin OSB-levy (Kronospan)*

### **2.2.3 Kuitulevyt**

Kuitulevyt ovat puukuiduista kovaksi puristettuja levyjä, joita voidaan valmistaa kuiva- ja märkämenetelmin. Kuivamenetelmässä kuidut ovat kuivia ja kuitujen sidonta toisiinsa tapahtuu liiman avulla. Kuivamenetelmässä ei voida hyödyntää puun omia liima-aineita, mutta levyjen valmistus on yksikertaista, ja levyn molemmat pinnat jäävät sileäksi. Kuivamenetelmällä valmistettuja kuitulevyjä ovat esimerkiksi MDF-levyt (Medium Density Fibreboard). Kuvassa 5 on Emport Oy:n tuottama MDF-levy.



*Kuva 5. MDF-levy (Emport Oy)*

Märkämenetelmässä puukuidut ovat vedessä. Tästä veden ja puukuitujen seoksesta muodostetaan paksuja levyaihioita, jotka puristetaan kuumapuristimessa ohuiksi kuitulevyiksi. Tässä prosessissa kuidut

sitoutuvat toisiinsa pääosin puun omien liima-aineiden vaikutuksesta, vaikka usein prosessiin lisätäänkin hieman liimaa. Märkämenetelmällä valmistetuissa kuitulevyissä toinen pinta on sileä ja toinen viirakuviainen. Tämä johtuu siitä, että kuumapuristuksessa käytetään pienisilmäistä metalliverkkoa toisella pinnalla, jotta levyaihiosta voidaan poistaa siinä oleva vesi puristuksen aikana. Märkämenetelmällä valmistettuja levyjä ovat esimerkiksi kovalevyt. Kuvassa 6 on esimerkki kovalevystä. (Wood Handbook, 2010, s.261)



*Kuva 6. Suomen Kuitulevy Oy:n Rakentajan kovalevy (Suomen Kuitulevy Oy)*

#### **2.2.4 Liimapuulevy**

Liimapuu valmistetaan rimoista tai laudoista liimaamalla ja puristamalla ne yhteen. Näin pystytään muodostamaan massiivisia puulevyjä, jotka muistuttavat lautaa ja ovat kestäviä. Liimapuulevyä tuotetaan eri kokoisina ja eri puulajeista. (Wood Handbook, 2010, s.268-269)

Liimapuulevyjä voidaan valmistaa esimerkiksi 18 x 200 x 1200 mm kokoiseksi tai huomattavasti suuremmaksikin. MetsäWoodin kuningaspalkkia valmistetaan jopa 32 metriä pitkäksi palkiksi (Metsä Wood, Suomi). Tuotantotapa näissä on samanlainen, mutta levyyn käytettyjen rimojen koko ja määrä ovat erilaiset. Pieniä liimapuulevyjä käytetään paljon huonekalujen valmistukseen ja suuria levyjä voidaan käyttää rakennuksien kantaviin rakenteisiin. Kuvassa 7 näkyy eripaksuisia liimapuulevyjä.



*Kuva 7. Liimapuulevy (Oy Kohiwood Ltd)*

### **2.2.5 CLT-levy**

CLT-levyt (Cross-Laminated Timber) ovat massiivipuisia levyjä, jotka koostuvat ristiinliimatuista lamelli- eli puulevykerroksista. Levyt voivat koostua 3, 5, 7 tai 8 kerroksesta. Kerrosten paksuus vaihtelee useimmiten 20 ja 50 millimetrin välillä, mutta voi olla myös tätä ohuempi tai paksumpi. Koko levyn paksuus yleisimmin 60–400 mm. Tätä ohuempaa CLT-levyä on myös saatavilla pyynnöstä. (Stora Enso Oyj)

CLT-levyt soveltuvat puutalojen kantaviksi rakenteiksi ja niitä voidaan työstää valmiiksi runkoelementeiksi. CLT-elementtejä voidaan käyttää jopa näkyvänä rakenteena, vaikka tämä ei kovin yleistä olekaan. CLT-elementtien valmiusaste on korkea, joka nopeuttaa rakentamista. CLT-levyillä on useita valmistajia sekä tuotemerkkejä kuten: CLT, KLH, X-LAM, Haas BSP, Leno, Binder BBS. (Kiintopuu)

## **2.3 Eristemateriaalit**

### **2.3.1 Hunajakenнопahvi**

Hunajakenнопahvi valmistetaan pahvista muodostamalla kuusisivuisia ytimiä vierekkäin. Tämä mahdollistaa kevyen rakenteen, joka omaa hyvän

puristuslujuuden. Hunajakennoilla haetaankin eri rakenteisiin keveyttä ja kestävyyttä. Hunajakennot itsessään eivät vielä riitä rakenteeksi vaan se tarvitsee pintakerroksen hunajakennojen suojaksi. Kuvassa 8 on esitetty pahvipäällysteinen hunajakennolevy, joka on jo itsessään sandwich-rakenne, mutta jota voidaan käyttää myös eristeenä sandwich-rakenteessa. (Eltete TPM)



*Kuva 8. Hunajakennolevy, jossa hunajakennon päällä on pahvipäällyste. Kuvassa oleva levy on Eltete TPM Oy:n tuote (ElteteTPM)*

### **2.3.2 Muovieristeet**

Muoviset eristeet kuten polystyreeni ja polyuretaani ovat paljon käytettyjä eristeitä rakennusteollisuudessa. Niiden kevyt rakenne ja hyvät lämmöneristysominaisuudet tekevät niistä haluttuja materiaaleja. Esimerkiksi EPS- ja XPS-eristeet on valmistettu polystyreenistä. EPS-eriste (puhekielessä Styroxina tunnettu) on paisutettua polystyreeniä ja XPS-eriste on suulakepuristettua polystyreeniä. XPS:n solurakenne on suljettu ja yhtenäinen. Tämä antaa XPS:llä paremman eristävyys ilmaa ja vesihöyryä vastaan. Suulakepuristuksella tuotettu eristelevy on esitetty kuvassa 9. (McBride, 2009)



*Kuva 9. Finnfoamin suulakepuristettu XPS-eriste (Finnfoam Oy)*

Muovieristeitä on mahdollista kierrättää ja osaa niistä voidaan polttaa. Kierrätykseen kelpaavien materiaalien tulee olla puhtaita. Osaa muoveista voidaan käyttää uusien materiaalien tuotantoon tai energian tuottamiseen polttamalla. Muovieristeet eivät kuitenkaan noudata kestävän kehityksen periaatteita, koska ne valmistetaan uusiutumattomista luonnonvaroista.

### **2.3.3 Kuitulevyt**

Kuitulevyt soveltuvat myös käytettäväksi välieristeenä sandwich-rakenteissa. Esimerkiksi balsapuusta tehtyä kuitulevyä on käytetty monissa sandwich-rakenteissa sen keveyden takia ( $60\text{--}200\text{ kg/m}^3$ ). Sillä on myös hyvät lujuus- ja eristysominaisuudet. (Bekisli et al. 2004)

Kuitulevyn tiheydellä on vaikutusta rakenteen lujuusominaisuuksiin. Srivaro et al. (2015) huomasivat testeissään, että kuitulevyn tiheyden kasvaessa, sen kimmomoduuli ja taivutuslujuus kasvavat, kun kuitulevyä käytettiin eristemateriaalina. Testeissä käytetyt kuitulevyt olivat paksuudeltaan 14,6 mm, 16,4 mm ja 18,6 mm, niin että sandwich-rakenteen kokonaispaksuus oli 20 mm. Kuitulevyjen tiheydet vaihtelivat  $200\text{ ja }450\text{ kg/m}^3$  välillä. Pintalevyinä käytettiin viiluja kumipuusta. (Srivaro et al. 2015)

### **2.3.4 Korkki**

Välieristeenä voidaan käyttää myös korkista tehtyjä levyjä. Korkki on suhteellisen kevyttä materiaalia ( $200\text{--}300\text{ kg/m}^3$ ) ja sillä on hyvät



eristävyysominaisuudet. Korkkia on testattu monissa sandwich-rakenteissa erilaisten pintalevyjen kanssa kuten vanerin (Lakreb et al. 2015) ja hiili/epoksi-levyjen kanssa (Reis et al. 2009).

Lakreb et al. (2015) testasivat perinteistä sandwich-rakennetta sekä rakenteita, joissa oli useampia kerroksia. Pinta- ja välilevyt olivat 1,5 millimetrin paksuisia viiluja aleppomännystä, ja eristelevyt olivat agglomeroitua korkkia. Agglomeroidun korkin jakeen koko oli 1-5 millimetriä. Perinteisessä sandwich-rakenteessa oli yksi 40 mm eristelevy. Muita rakenteita oli 3 erilaista. Ensimmäisessä niistä oli kaksi 20 mm eristelevyä, joiden välissä oli yksi välilevy. Toisessa oli kaksi 15 mm eristettä ja yksi 10 mm eriste, jotka oli eroteltu kukin välilevyllä. Kolmannessa rakenteessa oli neljä 10 mm eristettä, joiden välissä oli välilevyt. Rakenteiden lujuusominaisuudet nousivat mitä enemmän niissä oli eristekerroksia ja välilevyjä. Esimerkiksi maksimivoima oli perinteisessä sandwich-rakenteessa 1900 N, kun se rakenteessa, jossa oli neljä eristekerrosta, oli 2800 N. (Lakreb et al. 2015)

### **2.3.5 Muut eristeet**

Shivakumar et al. (2006) testasivat eristettä, joka on tehty kivihiilitehtaiden ylijäämästä, lentotuhkasta. Lentotuhkaeristeen tuotanto on helposti skaalattavissa, ja sitä on helppo vaahdottaa. Eristeen lujuusominaisuudet ovat kohtuullisen hyvät (kimmokerroin 2540 MPa). Hyvänä puolena lentotuhkaeristeessä on sen mahdollisuudet valmistaa hyvin palosuojattua eristettä. Lentotuhka ei kuitenkaan tue kestäväen kehityksen periaatteita, vaikka se valmistetaankin tehtaan ylijäämistä. (Shivakumar et al. 2006)

## **2.4 Sandwich-rakenteet**

Sandwich-rakenne on siis yksinkertaisimmillaan kahdesta pintalevystä ja yhdestä eristemateriaalista valmistettu komposiitti. Sandwich-rakenteessa voi kuitenkin olla useampiakin kerroksia eri materiaaleista. Eräässä

tutkimuksessa pintalevyn ja eristeen väliin laitettiin välikerros lisäämään rakenteen jäykkyyttä. Välikerroksen tulisi olla jäykempää kuin eristemateriaali ja mieluiten paksumpi kuin pintalevy. Välikerros mahdollistaa erittäin ohuiden pintalevyjen käytön kuten metallilevyjen sekä edullisen eristemateriaalin käytön kuten XPS tai PUR eristeiden käytön vain pienellä massan lisäyksellä (Mamalis et al. 2008). Kyseisessä tutkimuksessa oli kokeiltu lasikuitu-epoksi ja vanerilevy välikerrosta.

Kawasaki et al. (2006a) testasivat sandwich-rakennetta, jossa pintalevyinä käytettiin lehtikuusesta tehtyä 3-kerroksista 9 millimetriä paksua vaneria, ja eristeenä kuitulevyä, joka oli tehty intianmerantipuusta. Rakenteen lopulliseksi paksuudeksi haluttiin 50 millimetriä. Eristeen tiheys testeissä oli 350 ja 400 kg/m<sup>3</sup> ja vanerin tiheys 600 kg/m<sup>3</sup>. Sandwich-rakenteiden lopulliset tiheydet olivat 430 ja 480 kg/m<sup>3</sup>. Rakenteiden lujuudet testattiin 4-pisteen taivutuskokeella. Tiheämmän rakenteen (480 kg/m<sup>3</sup>) kimmokertoimeksi saatiin 7800 MPa ja kevyemmän rakenteen (430 kg/m<sup>3</sup>) 8100 MPa. (Kawasaki et al. 2006a)

Sandwich-rakenteet voidaan tehdä myös niin, että eristemateriaalina käytetyn kuitulevyn molemmiin puolin liimataan viilut. Eräässä kokeessa testattiin 12 millimetriä paksuja sandwich-rakenteita, joissa pintalevyt olivat viiluja merantipuusta, ja eristemateriaali oli nutkansypressistä tehtyä kuitulevyä. Viilujen paksuudet olivat 0,55 mm, 1 mm ja 2 mm, niin että rakenteen kokonaispaksuus oli 12 mm. Näiden rakenteiden kimmokertoimet olivat 3000, 4500 ja 6000 MPa. Viilujen syyt olivat yhdensuuntaisia rakenteen pituuden kanssa, ja rakenteen tiheys oli 450 kg/m<sup>3</sup>. (Kawasaki 1999)

Sandwich-rakenne voidaan rakentaa myös niin, että normaalisti pintalevyksi luokiteltu materiaali tulee eristelevyksi, ja normaalisti eristelevyksi luokiteltu materiaali pintalevyksi. Klimek et al. (2016) testasivat rakennetta, jossa pintalevyt olivat kuitulevyä, ja välieriste oli tehty vanerista. Vanerieriste ei ollut levymäisessä muodossa vaan siitä tehtiin rimoja, jotka asetettiin hunajakennomaiseen muotoon. Rakenteesta tuli kevyt (<400 kg/m<sup>3</sup>) ja

kestävä. Tämän lisäksi rimojen välit on mahdollista täyttää muilla kevyillä eristemateriaaleilla kuten eristevaahdoilla tai kuiduilla. (Klimek et al. 2016)

Puupohjaisilla sandwich-rakenteilla voidaan saavuttaa myös hyviä lämmöneristysominaisuuksia. Kawasaki et al. (2006b) testasivat rakenteita, joissa oli 9 mm paksut pintalevyt ja 78 mm paksu eriste, niin että kokonaispaksuus oli 96 mm. Rakenteen tiheyksiä oli kaksi erilaista, 350 ja 400 kg/m<sup>3</sup>. Testit antoivat erittäin hyviä lämmöneristävyys tuloksia, jotka voivat kilpailla perinteisten muovieristeiden kanssa, kuten suulakepuristetun polystyreenin eli XPS-eristeen kanssa. (Kawasaki et al. 2006b)

### **3 MATERIAALIT JA TUTKIMUSMENETELMÄT**

#### **3.1 Työssä käytetyt pintamateriaalit**

Työhön valittiin pintamateriaaleiksi koivuvaneri, havuvaneri, liimapuulevy ja OSB-levy. Pintalevyt liitettiin eristelevyyn liimalla puristuksen avulla. Koivuvaneria oli sekä 4 mm että 9 mm paksuisena, joissa pintaviilujen syysuunta oli yhdensuuntainen levyn pituuden kanssa. 4 mm paksuista vaneria käytettiin ainoastaan monikerroksisessa rakenteessa. 9 mm paksuista vaneria käytettiin perinteisen 3-kerroksisen rakenteen kanssa. Havuvaneri oli paksuudeltaan 9 mm ja sitä oli kahdenlaista. Toisessa pintaviilun syysuunta oli yhdensuuntainen ja toisessa kohtisuorassa levyn pituuden kanssa. Liimapuulevy ja OSB-levy olivat paksuudeltaan 11 mm ja molemmissa pinnan syysuunta oli yhdensuuntainen levyn pituuden kanssa.

##### **3.1.1 Koivuvaneri**

Koivuvaneriksi valittiin 9 millinen WISA-birch vaneri (UPM Plywood, Suomi), jossa oli 7 viilukerrosta ristiinliimattuna ja laatuna BB/WG. Vanerin pintaviilu oli yhdensuuntainen sen pituuden kanssa. Koivuvaneri ei ole edullisin pintamateriaali markkinoilla, mutta sen hyvät lujuusominaisuudet olivat

tärkeä syy, että se valittiin yhdeksi pintamateriaaliksi. Wisa-birch vanerin neliöhinnaksi tuli 14,78 €.

Monikerroksisessa sandwich-rakenteessa koivuvaneri oli paksuudeltaan 4 millimetriä. 4 millimetrin paksuisessa koivuvanerissa on 3 viilukerrosta ristiinliimattuna. Vaneri oli UPM:n valmistamaa Wisa-birch vaneria (UPM Plywood, Suomi). 4 millisen koivuvanerin neliöhinnaksi tuli 11,50 €.

BB/WG laatu on BB ja WG vanerilaatujen sekoitus. BB laadulla terveiden oksien sallittu läpimitta on 25 mm ja oksasumma 60 mm/m<sup>2</sup>. Muiden oksien ja reikien sallittu läpimitta on 6 mm ja oksasumma 25 mm/m<sup>2</sup>. WG laadulla terveiden oksien sallittu läpimitta on 65 mm ja oksasumma 600 mm/m<sup>2</sup>. Muiden oksien ja reikien sallittu läpimitta on 15 mm ja oksasumma 100 mm/m<sup>2</sup>. (Metsäteollisuus Ry, 2005)

### **3.1.2 Havuvaneri**

Työhön valittiin 9 millinen havuvaneri (Metsä Wood, Suomi). Vaneri oli valmistettu 3 ristiinliimatusta kuusiviilusta, jonka laatuluokitus oli III/III. Vanerin pintaviilu oli yhdensuuntainen sen pituuden kanssa. Havuvaneri on huomattavasti koivuvaneria edullisempaa. Havuvanerin lujuusominaisuudet ovat hyvät, vaikka ei samaa luokkaa kuin koivuvanerilla. Esimerkiksi taivutuslujuus on yli kaksi kertaa pienempi (Metsäteollisuus Ry, 2005). 9 mm havuvanerin hinnaksi tuli 7,51 €/m<sup>2</sup>.

Havuvaneria testattiin myös niin, että pintaviilun syyt olivat pystysuoraan sandwich-rakenteen pituuden kanssa. Kyseinen havuvaneri oli paksuudeltaan 9 mm ja se oli valmistettu 5 ristiinliimatusta mäntyviilusta. Vanerilevy oli tuotettu Brasiliassa.

Laatuluokituksessa III/III helmioksien ja terveiden oksien sallittu läpimitta on 50 mm. Muiden oksien ja reikien sallittu läpimitta on 40 mm ja oksasumma 500 mm/m<sup>2</sup>. Esimerkiksi I laadun vanerissa helmioksia sallitaan 3 kpl/m<sup>2</sup> ja

terveiden ja kiinteiden oksien sallittu läpimitta on 10 mm ja oksasumma 30 mm/m<sup>2</sup>. (Metsäteollisuus Ry, 2005)

### 3.1.3 Liimapuulevy

Liimapuulevyt olivat männystä valmistettua liimalevyä (Siparila Oy, Suomi). Kooltaan ne olivat 18 x 200 x 1200 millimetriä. Levyt höylättiin 11 millimetrin paksuisiksi, jotta rakenteesta tulisi kevyempi ja levyjen paksuus saataisiin lähemmäksi muiden pintamateriaalien paksuutta. Pinnan syysuunta oli yhdensuuntainen sen pituuden kanssa. Liimapuulevyn neliöhinta oli selvästi korkein verrattuna muihin pintamateriaaleihin. Se oli 25,63 €/m<sup>2</sup>.

### 3.1.4 OSB-lastulevy

OSB-lastulevyt olivat Kronospanin 11 millistä levyä (Kronoplus Limited, Kypros). Levyt olivat 3-kerroksista lastulevyä. Levyn pintakerroksen lastut olivat yhdensuuntaisia levyn pituuden kanssa. OSB-levy ei yllä lujuusominaisuuksiltaan samalla tasolle kuin muut pintamateriaalit, mutta se on huomattavasti edullisempaa kuin muut materiaalit. OSB-levyn neliöhinta oli 4,76 €.

Taulukossa 1 on koottuna eri pintamateriaalien neliöhinnat, kimmomoduuli ja taivutuslujuus sekä valmistaja ja mistä se on hankittu.

*Taulukko 1. Pintamateriaalien lujuuksia ja neliöhinnat (Lähteet: \*Vanerikäsikirja, Metsäteollisuus Ry, \*\*5 viiluiselle havuvanerille ei löytynyt lujuusarvoja valmistajalta eikä vanerikäsikirjasta, \*\*\* Genetrade Wood Products Oy, \*\*\*\*Puuinfo Oy)*

<b>Pintamateriaali Valmistaja / Myyjä</b>	<b>Neliöhinta</b>	<b>Kimmomoduuli (MPa)</b>	<b>Taivutuslujuus (MPa)</b>
Koivuvaneri (9 mm)* UPM / K-Rauta	14,78 €	11395	45,6

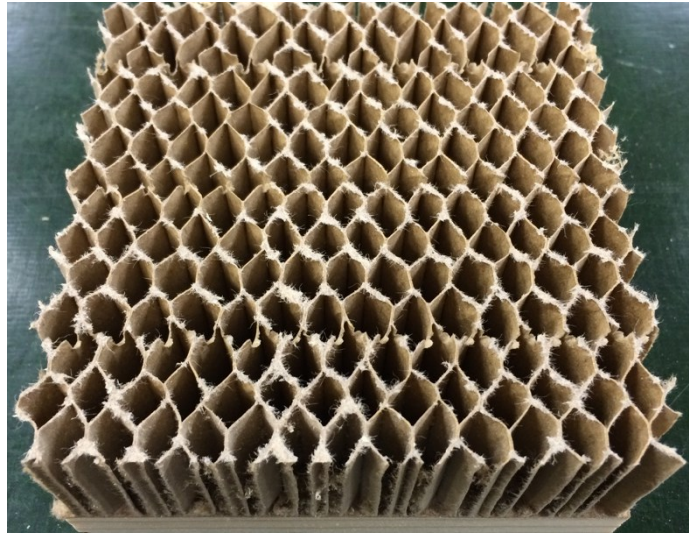
Koivuvaneri (4 mm)* UPM / K-Rauta	11,50 €	16471	65,9
Havuvaneri (3 viilua)* MetsäWood / Stark	7,51 €	11461	28,7
Havuvaneri (5 viilua)** Brasilia / Bauhaus	5,52 €	-	-
OSB / 3 *** Kronospan / K-rauta	4,76 €	3500	20
Liimapuulevy **** Siparila / Stark	25,63 €	10 900	91

Liimapuulevylle ei löytynyt valmistajien tarjoamia lujuusarvoja 11 milliselle levylle, joten taulukossa olevat arvot ovat männyn lujuusarvoja. Liimapuulevyn lujuudella on perinteisen sahatavaran kanssa samoja piirteitä. Liimapuulla on kuitenkin suurempi keskimääräinen lujuus ja pienempi lujuuden hajonta kuin perinteisellä sahatavaralla. (Liimapuukäsikirja, Osa 2, s. 10, 2015)

### 3.2 Työssä käytetyt eristemateriaalit

Testeihin valittiin eristemateriaaleiksi hunajakennolevy (Eltete TPM Oy, Suomi) sekä Finnfoam-eriste (Finnfoam Oy, Suomi). Molemmat materiaalit olivat paksuudeltaan 30 mm. Hunajakennolevyn neliöhinta oli 8,13 €/m<sup>2</sup> (tilattu suoraan Eltete TPM Oy:ltä) ja Finnfoam-eristeen 5,07 €/m<sup>2</sup> (K-Rauta).

#### 3.2.1 Hunajakennolevy



*Kuva 10. Hunajakennolevyn sisärakenne.*

Kuvassa 10 näkyy hunajakennolevyn rakenne. Työssä käytetyn hunajakennolevyn kennojen koko oli 8 mm ja paksuus oli 30 mm. Hunajakennolevyä on saatavilla myös 12 mm kennokoolla Eltete TPM:n kautta (Eltete TPM Oy, Suomi). Muita paksuuksia on saatavilla 5, 10 ja 20 millimetrisenä.

### **3.2.2 Finnfoam**

Työssä käytetty Finnfoam-eriste oli suulakepuristettua polystyreeniä eli XPS-eristettä. Eristelevy oli paksuudeltaan 30 mm, ja sitä on saatavilla useana eri paksuutena 20 ja 160 millimetrin välillä. (Finnfoam Oy)

### **3.3 Rakenteet**

Kuvissa 11 ja 12 näkyy yksittäinen moduulirakenne sekä moduulit yhdistettynä yhdeksi seinä-, katto- ja lattiamoduuliksi.



*Kuva 11. Yksittäinen moduuli*



*Kuva 12. Seinä-, katto- ja lattiamoduulit*

Sandwich-rakenteet koottiin liimaamalla ne yhteen vanerin esipuristimen avulla. Puristukseen asetettiin noin 2,6 kPa paine, jossa ne olivat noin 60 minuuttia. Liimana käytettiin Biltteman sisäkäyttöön tarkoitettua puuliimaa (Biltema Suomi Oy, Suomi), joka oli yksikomponenttista dispersioliimaa. Liimaa levitettiin levyjen väliin 150 – 200 g/m<sup>2</sup> liimanlevityslastalla.

Liiman määrällä ei ole oleellista vaikutusta sandwich-rakenteen lujuusominaisuuksiin. Eräässä tutkimuksessa testattiin sandwich-rakenteita, joissa pintalevyinä käytettiin viiluja kumipuusta ja eristemateriaalina öljypalmua. Rakenteet olivat paksuudeltaan 20 mm, ja niistä tehtiin testikappaleita kolmella eri liiman määrällä: 150, 250 ja 350 kg/m<sup>3</sup>. Liiman määrällä ei huomattu olevan suurta vaikutusta rakenteen lujuusominaisuuksiin. (Srivaro et al. 2012)

Kuvassa 13 voi nähdä liiman levityksen koivuvanerille.





*Kuva 13. Liiman levitys koivuvanerille*

Liimauksen jälkeen koekappaleet sahattiin vastaamaan EN 408 standardin mittoja (SFS-EN 408 + A1, 2012). Tämän jälkeen kappaleet tasaannutettiin huoneessa, jossa lämpötila ja ilmankosteus olivat vakio. Lämpötila oli 20 °C ja ilmankosteus oli 65 %. Valmiit koekappaleet olivat tasaannutuksessa vähintään 2 viikkoa.

Erilaisia rakenteita testejä varten tehtiin yhteensä 9 kappaletta.

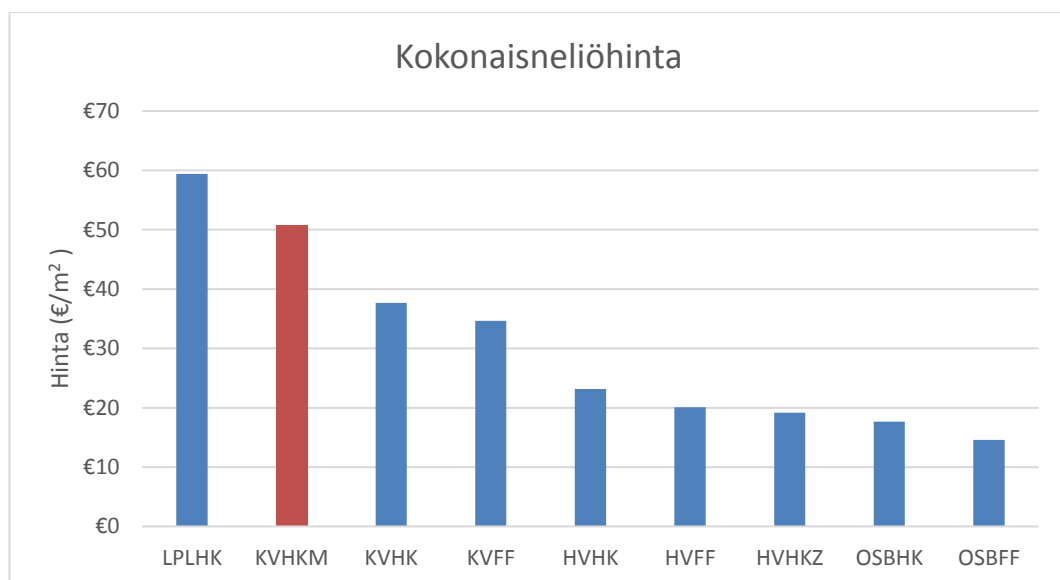
1. koivuvaneri + hunajakennolevy (KVHK)
2. havuvaneri + hunajakennolevy (HVHK)
3. liimapuulevy + hunajakennolevy (LPLHK)
4. OSB-levy + hunajakennolevy (OSBHK)
5. koivuvaneri + polystyreenilevy (Finnfoam) (KVFF)
6. havuvaneri + polystyreenilevy (Finnfoam) (HVFF)
7. OSB-levy + polystyreenilevy (Finnfoam) (OSBFF)
8. havuvaneri (kohtisuorassa) + hunajakennolevy (KVHKZ)
9. koivuvaneri (4 mm) + hunajakennolevy (monikerroksinen) (KVHKM)

Rakenteissa 1-7 syysuunta oli yhdensuuntainen sandwich-rakenteen pituuden kanssa. Rakenteessa 8 vanerilevyn syysuunta oli kohtisuorassa sandwich-rakenteen pituuden kanssa.

Rakenne 9 on erilainen kuin muut rakenteet. Kyseinen rakenne koostu kolmesta koivuvanerilevystä ja kahdesta hunajakennolevystä. Koivuvanerilevyt ovat pintalevyinä sekä yhtenä välilevynä hunajakennolevyjen välissä. Vanerilevyn pintaviilun syysuunta oli yhdensuuntainen sandwich-rakenteen pituuden kanssa.

Polystyreeni ei noudata kestävän kehityksen periaatteita, koska se valmistetaan uusiutumattomista luonnonvaroista. Se on kuitenkin helposti kierrätettävissä, ja se haluttiin vertailumateriaaliksi testeihin. Polystyreenilevyjen hyviin puoliin kuuluu niiden kevyt rakenne ja edullisuus.

### 3.3.1 Rakenteiden kokonaisneliöhinnat



Kuva 14. Rakenteiden kokonaisneliöhinnat

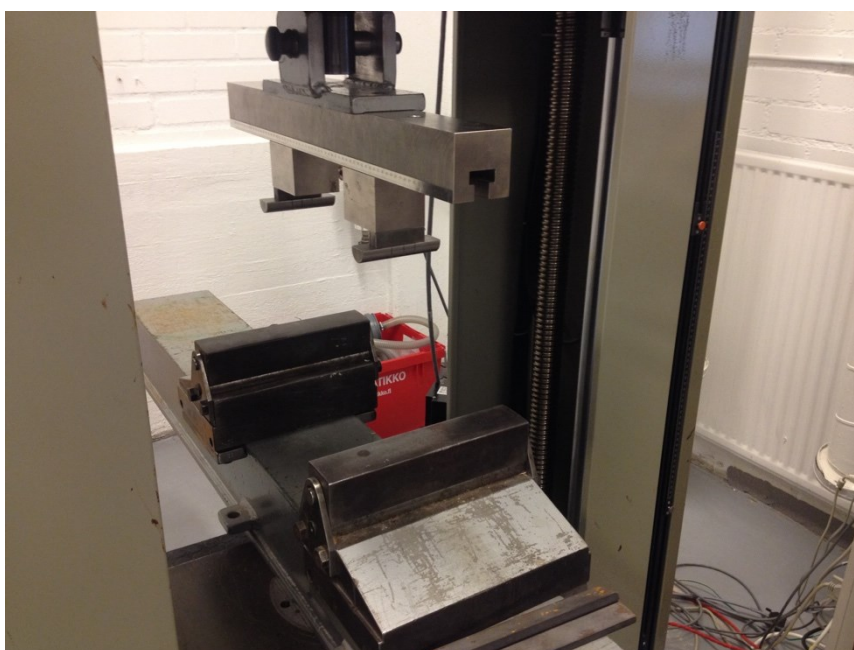
Kuvassa 14 voi nähdä eri rakenteiden kokonaisneliöhinnat. Liimapuulevystä tehty rakenne on selvästi kallein ratkaisu (59,39 €/m²) ja edullisin neliöhinta on OSB-lastulevyllä yhdistettynä Finnfoam-eristeeseen (14,59 €/m²). Finnfoam-eriste ei kuitenkaan noudata kestävän kehityksen periaatteita.

### 3.4 Koejärjestelyt

Rakenteille suoritettiin lujuusmittauksia standardin EN 408 mukaan 4-pisteen taivutuskokeella. Kyseisellä testillä voidaan mitata sandwich-rakenteiden kimmokerroin, taivutuslujuus ja puristuslujuus. Testikappaleen koko määräytyy sen paksuuden perusteella standardin mukaan. 48 millimetriä paksujen rakenteiden pituuden tuli olla vähintään 912 mm pitkiä, ja 52,7 mm paksujen rakenteiden minimipituus oli 1001,3 mm. Koekappaleiden leveydeksi tuli 188 mm.

Standardin mukaan testiolosuhteet tulee olla vakiot. Lämpötilan tulee olla  $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$  ja ilman suhteellisen kosteuden  $65 (\pm 5) \%$ .

Koekappaleiden testaus suoritettiin Zwick aineenkoestuslaitteella (Zwick 1475, Zwick Roell Group, Saksa, Kuva 15), johon koekappaleiden suuren pituuden takia asennettiin metallinen alapalkki. Laitteessa on neljä tukipistettä, kaksi koekappaleen alapuolella ja kaksi yläpuolella. Tukipisteiden etäisyyttä toisistaan voidaan liikuttaa tarpeen mukaan.



*Kuva 15. Zwick aineenkoestuslaite*

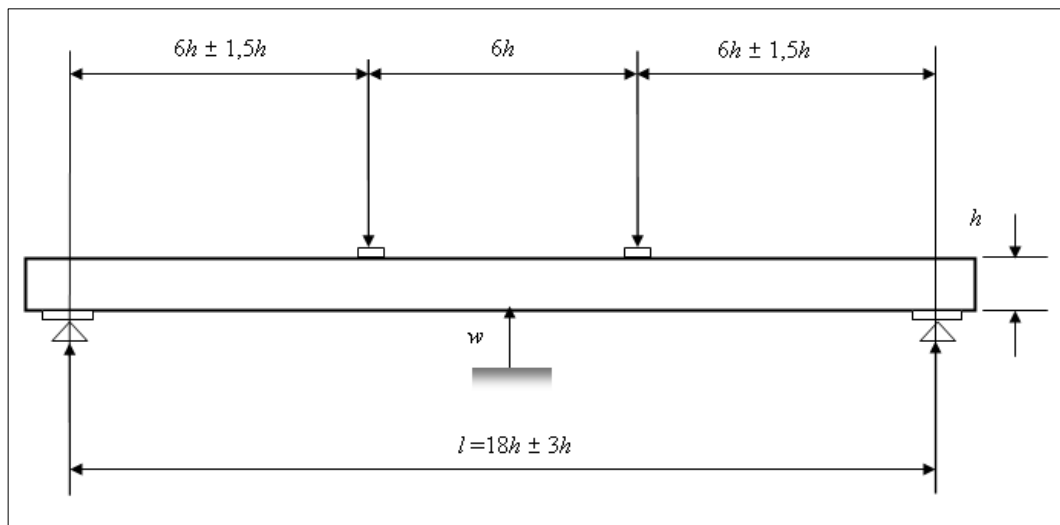
Koekappaleille tehtiin samaan aikaan sekä kimmokertoimen että taivutuslujuuden mittaukset, koska koeasetelmat näissä ovat samat.

### 3.5 Lujuusmittaukset

Jokainen koekappale oli tasaannutettu vähintään 2 viikkoa vakio lämpötilassa (20 °C) ja ilmankosteudessa (65 %). Koekappaleiden paksuudet vaihtelivat rakenteesta riippuen. Koivu- ja havuvaneria sisältävät rakenteet olivat 48 mm paksuisia. OSB- ja liimapuulevyistä tehdyt rakenteet olivat keskimäärin 52,7 mm paksuisia.

#### 3.5.1 Kimmokerroin

Testikappaleelle vaaditut mitat kimmokertoimen määrittämiseksi näemme kuvasta 16. Testikappaleen pituus tulee olla 19 kertaa sen paksuus EN 408 standardin mukaan. Testissä kuormituspisteiden välinen etäisyys kappaleen alapuolella on 18 kertaa sen paksuus kuvan mukaisesti. Yläpuolen tukipisteet ovat 6h etäisyydellä alapuolen tukipisteistä.



Kuva 16. EN 408 standardin mukainen testiasetus kimmokertoimen mittaamiseksi, jossa  $h$  on kappaleen paksuus ja  $w$  muodonmuutos.

Standardin mukaan kuormituspisteiden liike alaspäin ei saa ylittää 0,003h mm/s. Kimmokerroin voidaan laskea kaavalla:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1}\right)} \quad (1)$$

missä  $E_{m,g}$  on kimmokerroin (MPa)  
 $a$  on kuormitus- ja tukipisteen välinen etäisyys (mm)  
 $b$  on leveys (mm)  
 $h$  on paksuus (mm)  
 $(w_2 - w_1)$  on muodonmuutos 2 pisteen välillä (mm)  
 $(F_2 - F_1)$  on kuormituksen muutos 2 pisteen välillä (N).

### 3.5.2 Taivutuslujuus

Taivutuslujuutta varten testiasetelmat ovat samat kuin kimmokertoimen testeissä ja näin ollen ne suoritettiin samassa yhteydessä. Taivutuslujuuden laskemiseksi maksimi kuorma tulee saavuttaa  $300 \pm 120$  sekunnissa. Taivutuslujuus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (2)$$

missä  $f_m$  on taivutuslujuus (MPa)  
 $F$  on kuorma (N).

Tulosten analysointia varten koekappaleille laskettiin myös keskihajonta seuraavalla kaavalla:

$$\text{keskihajonta} = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (3)$$

missä  $x$  on  
 $\bar{x}$  on otoskeskiarvo  
 $n$  on koekappaleiden määrä.

## **4 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU**

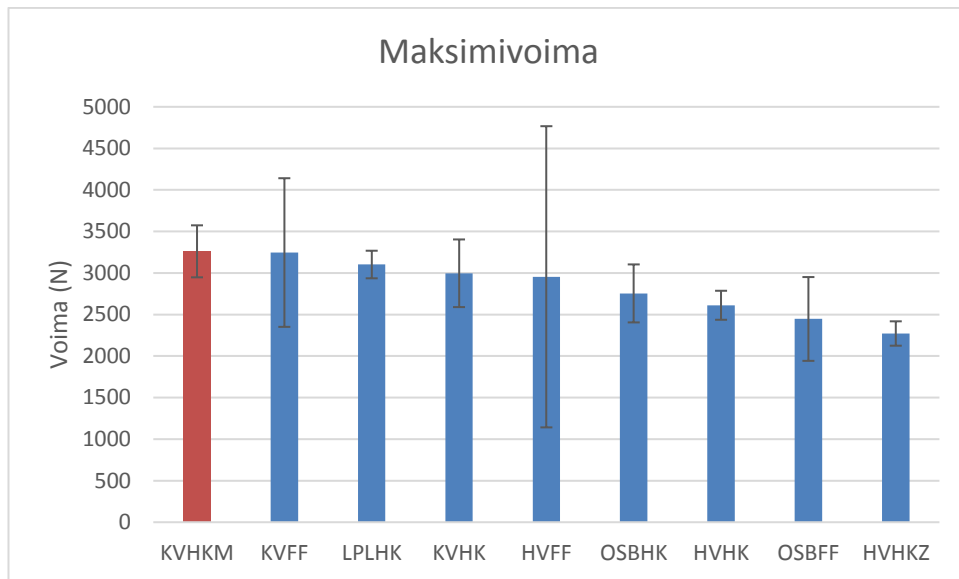
### **4.1 Lujuustestit**

Koekappaleille laskettiin maksimivoima, kimmokerroin, murtolujuus sekä venymä 1000 N kohdalla. Jokaisesta rakenteesta testattiin 4–6 koekappaletta.

Koekappaleiden kimmokertoimet laskettiin kaavalla (1) ja murtolujuudet kaavalla (2). Osalla koekappaleista (KVHK 1-2, HVHK 1-2, LPLHK 1-5) muodonmuutos kahden datapisteen välillä ( $w_2-w_1$ ) otettiin jännitys-venymäkäyrän lineaarisen osan keskiarvona. Näillä koekappaleilla testeissä käytetty erillinen mittakello venymän mittaamiseksi ei ollut yhteydessä Zwick-aineenkoestuslaitteeseen. Tästä syystä tarkkaa venymä- ja voimapisteen vastaavaa kohtaa ei voitu määrittää. Tämä ei kuitenkaan vaikuta suuresti kimmokertoimen arvoon, koska voima-venymäkäyrän lineaarisella osalla venymä pysyy tasaisena. Muiden koekappaleiden kohdalla mittakellon ja aineenkoestuslaitteen data voitiin yhdistää suoraan.

Kaikkien koekappaleiden tulokset löytyvät liitteestä 2.

### **4.2 Maksimivoima**



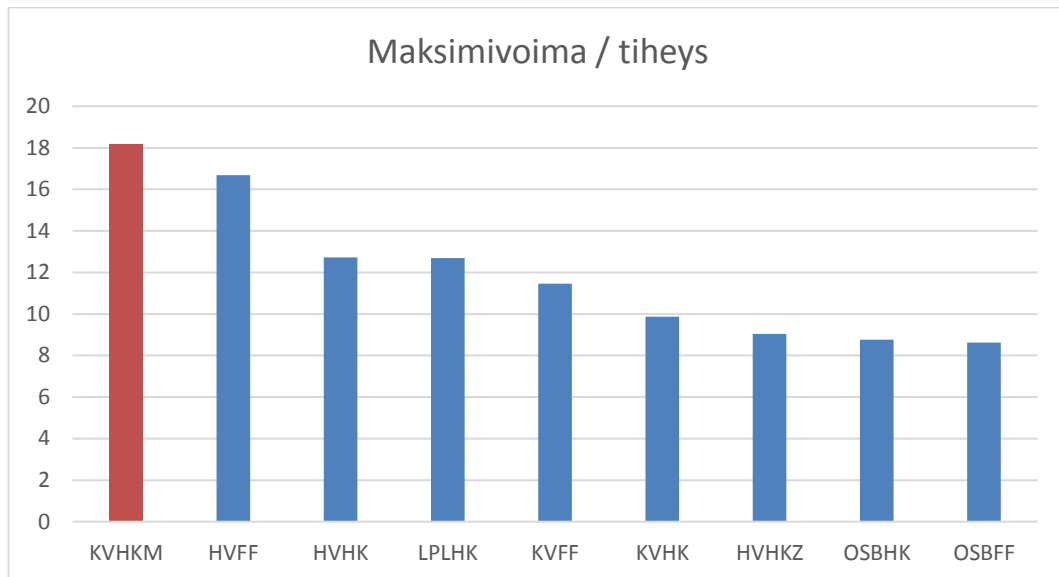
*Kuva 17. Maksimivoimien keskiarvot eri rakenteille.*

Maksimivoimien keskiarvot näkyvät kuvassa 17. Kuvassa punaisena näkyvä palkki on monikerroksisen koivuvaneri-hunajakennon rakenteen keskiarvo (3260 N). Perinteisistä rakenteista korkein maksimivoima oli koivuvaneri-Finnfoam-rakenteella (3250 N) ja matalin HVHKZ-rakenteella (2270 N). Havuvaneri-hunajakennorakenteen maksimivoima tippuu 13 %, kun vanerin pintaviilun syysuunta vaihtuu yhdensuuntaisesta kohtisuoraksi.

Samasta kuvasta voimme nähdä, että suurin keskihajonta on havuvaneri-Finnfoam-rakenteella. Kyseisestä rakenteesta löytyikin testien korkein 4766,3 N sekä matalin 1336,8 N maksimivoima. Myös koivuvaneri-Finnfoam-rakenteella keskihajonta oli kohtalaisen suurta. Tämä johtuu todennäköisesti vanerilevyjen laadun epätasaisuudesta, vaikka levyissä ei ollutkaan silmin nähtäviä heikkouksia. Etenkin havuvanerissa, joka oli 3-kerroksinen, oksien määrällä ja paikalla voi olla suuri vaikutus sen lujuusominaisuuksiin. Näin ollen pintalevyn pettäessä Finnfoam-eriste ei itsessään kestä suuria taivutusvoimia.

Lakreb et al. (2015) saivat 43 mm paksulle sandwich-rakenteelle maksimivoimaksi 1900 N. Pintalevyt kyseisessä rakenteessa olivat 1,5 mm paksuja mäntyviiluja ja eristelevy oli korkkia. Tämä on huomattavasti

pienempi maksimivoima kuin millään tämän testin rakenteista. Syy on mahdollisesti tässä testissä käytetyt selkeästi paksummat pintalevyt.

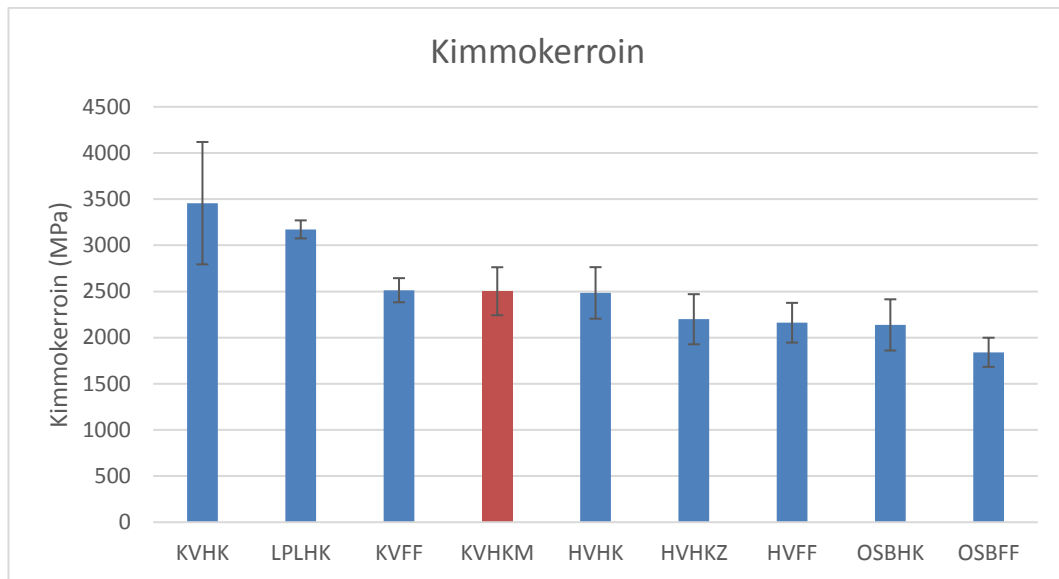


*Kuva 18. Maksimivoiman ja tiheyden suhde.*

Kuvassa 18 on esitetty maksivoiman ja tiheyden suhde ( $\text{N/kg/m}^3$ ). Vertailu on tehty jakamalla keskimääräinen maksimivoima keskimääräisellä tiheydellä. Rakenteet HVFF, HVHK, LPLHK ja KVFF antavat selkeästi kokonaistiheyttään kohden parempia maksimivoiman arvoja kuin HVHKZ, OSBHK ja OSBFF rakenteet. Perinteisten rakenteiden korkein maksimivoiman suhde tiheyteen on havuvaneri-Finnfoam rakenteella, ja matalin on OSB-levy-Finnfoam rakenteella.

#### 4.3 Kimmokerroin





*Kuva 19. Kimmokerrointen keskiarvot eri rakenteille.*

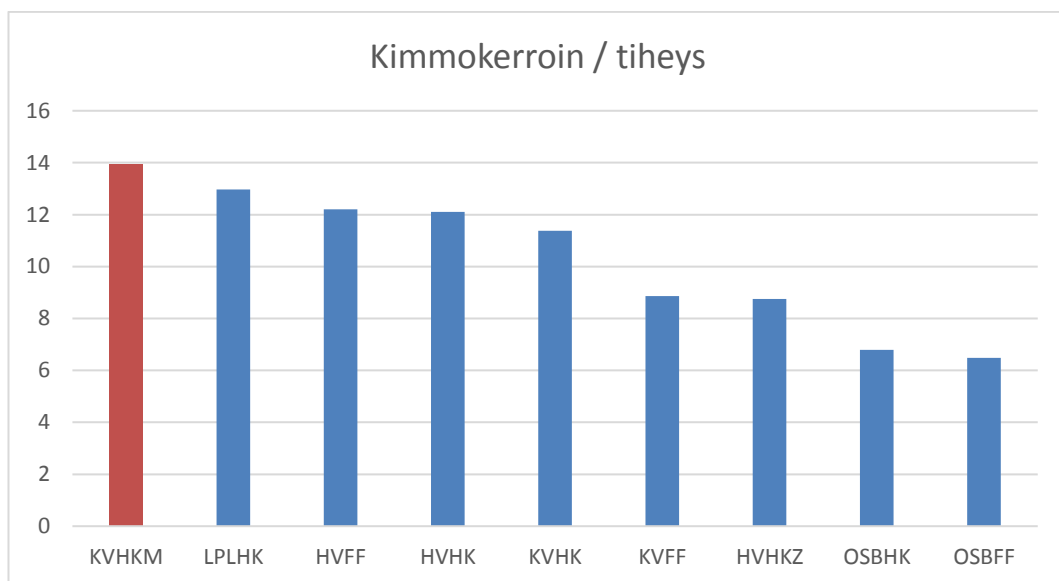
Kimmokerrointen keskiarvot näkyvät kuvassa 19. Korkein kimmokerroin oli koivuvaneri-hunajakennorakenteella (3460 MPa) ja matalin oli OSB-levy-Finnfoam-rakenteella (1840 MPa).

Koivuvaneri-hunajakennorakenteella oli testien perusteella suurin keksihajonta. Pienin hajonta oli liimapuulevy-hunajakennorakenteella. Koivuvaneri-hunajakennorakenteen KVHK 1 koekappaleella oli selvästi alhaisempi kimmokerroin (2510 MPa) kuin muilla, keskiarvon ollessa 3460 MPa.

Testien perusteella hunajakkenno antaa rakenteelle paremman kimmokertoimen kuin Finnfoam. Koivuvanerilla kimmokerroin tippuu 27 % hunajakennon vaihtuessa Finnfoamiin. Havuvanerilla sama kimmokertoimen pienentyminen on 13 % ja OSB-levyllä 14 %. Liimapuulevystä ei testeissä ollut kuin rakenne hunajakennolevyn kanssa. Havuvaneri-hunajakkenno rakenteella kimmokerroin tippuu 11 %, kun havuvanerin pintaviilun syysuunta muuttuu yhdensuuntaisesta kohtisuoraksi.

Kawasaki et al. (2006a) saivat 4-pisteen taivutuskokeissaan huomattavasti korkeampia kimmokertoimen arvoja rakenteella, jossa pintalevyt olivat

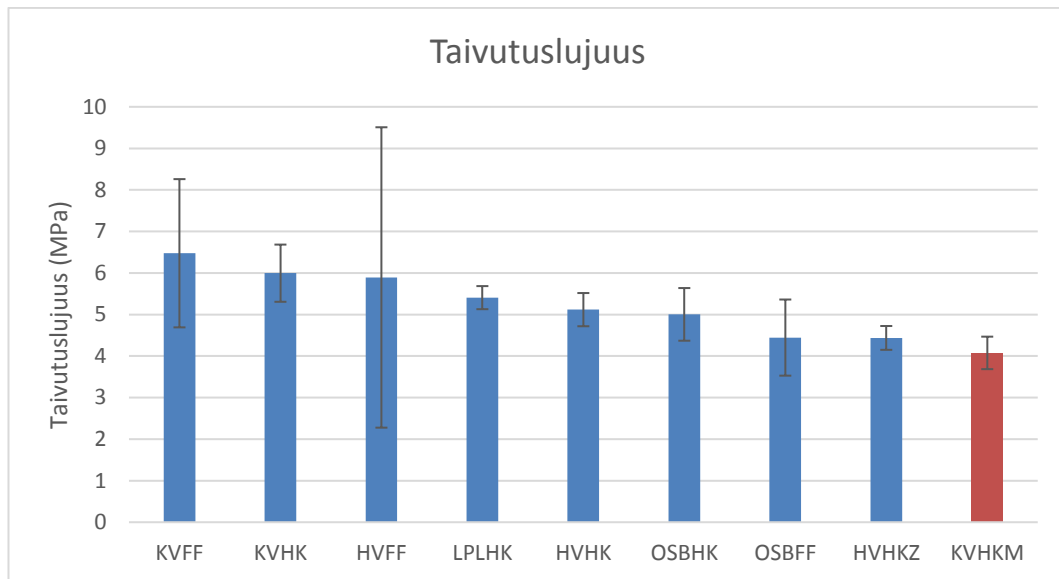
kuusivaneria ja eriste oli kuitulevyä. Sandwich-rakenteen kokonaispaksuus oli 50 mm, kimmokertoimen arvoksi saatiin 8100 MPa. Yksi syy näin paljon korkeampaan kimmokertoimeen saattaa olla eristelevyn lujempi rakenne. Kuitulevy itsessään on selkeästi lujempi materiaali kuin hunajakennolevy tai Finnfoam. Toinen syy tässä työssä saatuihin matalampiin kimmokertoimen arvoihin voi olla kimmokertoimen laskukaava. Tässä työssä kimmokertoimen kaavasta on poistettu leikkausjännityksen aiheuttama muutos. Jos leikkausjännitys huomioitaisiin, saisi kimmokerroin hieman korkeampia arvoja.



Kuva 20. Kimmokertoimen ja tiheyden suhde.

Kuvassa 20 voi nähdä eri rakenteiden suhteen kimmokertoimen ja tiheyden välillä ( $\text{MPa/kg/m}^3$ ). Selvästi paras kimmokertoimen ja tiheyden suhde perinteisistä rakenteista on liimapuulevy-hunajakennolevy rakenteella. Seuraavaksi paras suhde on HVFF- ja HVHK-rakenteilla. Heikoin suhde on OSBHK- ja OSBFF-rakenteilla.

#### 4.4 Taivutuslujuus



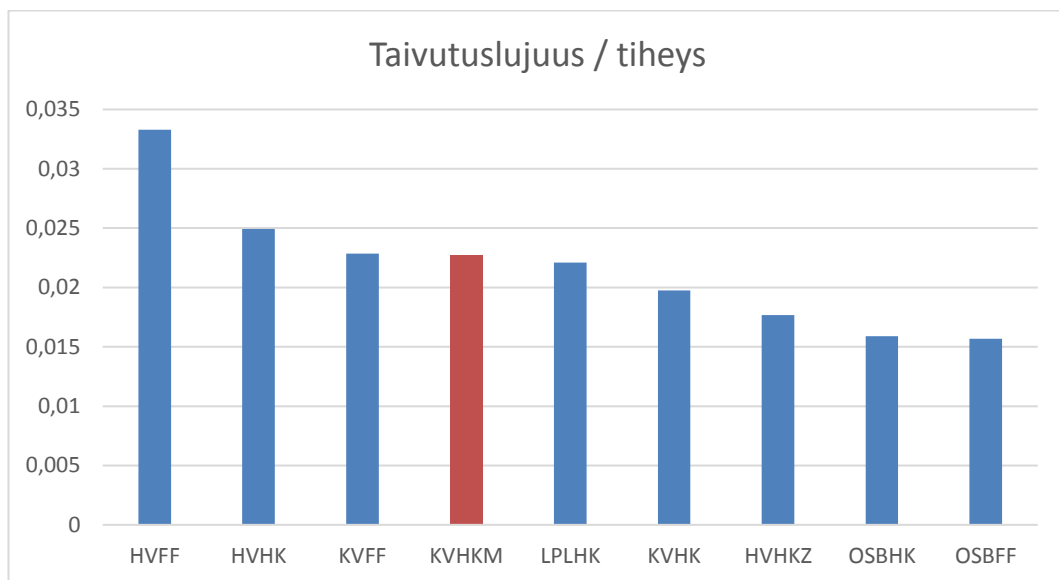
*Kuva 21. Taivutuslujuuksien keskiarvot eri rakenteille.*

Keskiarvot taivutuslujuuksille näkyvät kuvassa 21. Korkein taivutuslujuus oli koivuvaneri-Finnfoam-rakenteella (6,5 MPa) ja matalin HVHKZ-rakenteella (4,4 MPa). Monikerroksisen koivuvaneri-hunajakennorakenteen taivutuslujuus oli testien alhaisin (4,1 MPa). Havuvanerin pintaviilun syysuunnan vaihtuessa yhdensuuntaisesta kohtisuoraksi tippuu taivutuslujuus 13 %.

Pintamateriaaleista parhaimman taivutuslujuuden antaa koivuvaneri niin hunajakennon kuin Finnfoamin kanssa. Koivuvanerilla vaihdettaessa Finnfoamista hunajakennolevyyn taivutuslujuus tippuu 7 %. Havuvanerilla sama taivutuslujuuden pienentyminen on 13 %. OSB-levyn kohdalla hunajakennolevy tarjoaa paremman taivutuslujuuden ja vaihdettaessa Finnfoamiin taivutuslujuus tippuu 11 %.

Shalbafan et al. (2012) testasivat 19 mm paksuja sandwich-rakenteita, joissa pintalevyt olivat 5 mm paksua lastulevyä, ja eristelevy oli polystyreenilevyä. Kyseisen rakenteen taivutuslujuudeksi saatiin 10,9 MPa. Tämä on selvästi suurempi kuin tässä testissä parhaan taivutuslujuuden saanut KVFF-rakenne (6,5 MPa). Shalbafanin et al. (2012) testeissä oli myös toinen 19 mm paksu rakenne, jossa pintalevyt olivat 3 mm paksuja ja taivutuslujuus tälle oli (8,3 MPa). Suurempi taivutuslujuus 5 mm pintalevyllä

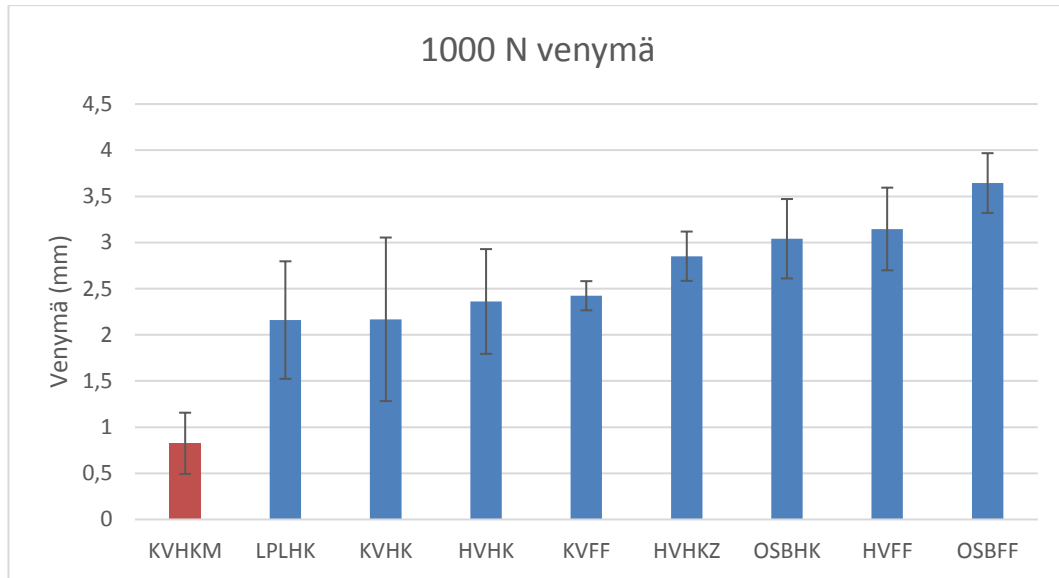
selittyy pintalevyn paksummasta suhteellisesta paksuudesta koko rakenteen paksuuteen verrattuna, kuten Shalbafan et al. (2012) ovat myös itse todenneet. Toinen syy suurempiin taivutuslujuuden arvoihin saattaa johtua hieman eri taivutuskokeesta. Shalbafan et al. (2012) käyttivät 3-piste taivutuskoeetta, kun taas tässä työssä käytettiin 4-piste taivutuskoeetta lujuusominaisuuksien mittaamiseksi. Toisaalta eräässä kokeessa vertailtiin 3-piste ja 4-piste taivutuskokeessa hiili/epoksi komposiitteja ja lopputulos oli, että 4-piste testi antaa todennäköisemmin korkeampia arvoja (Mujika, 2006). On myös tuloksia joiden mukaan 4-piste taivutuskoe antaa suurempia arvoja kuin 3-piste taivutuskoe (Chitchumnong et al. 1989). Näiden perusteella eri testimetodeilla saatuja taivutuslujuusarvoja ei voida verrata suoraan keskenään.



*Kuva 22. Taivutuslujuuden ja tiheyden suhde.*

Kuvassa 22 on esitetty eri rakenteiden taivutuslujuuden ja tiheyden suhde toisiinsa (MPa/kg/m<sup>3</sup>). Havuvaneri-Finnfoam-rakenne erottuu selvästi muita rakenteita paremmaksi. HVHK-, KVFF- ja LPLHK-rakenteet ovat keskiluokkaa perinteisten rakenteiden vertailussa. OSBHK- ja OSBFF-rakenteet ovat heikoimmat taivutuslujuuden ja tiheyden suhteen.

## 4.5 Venymä



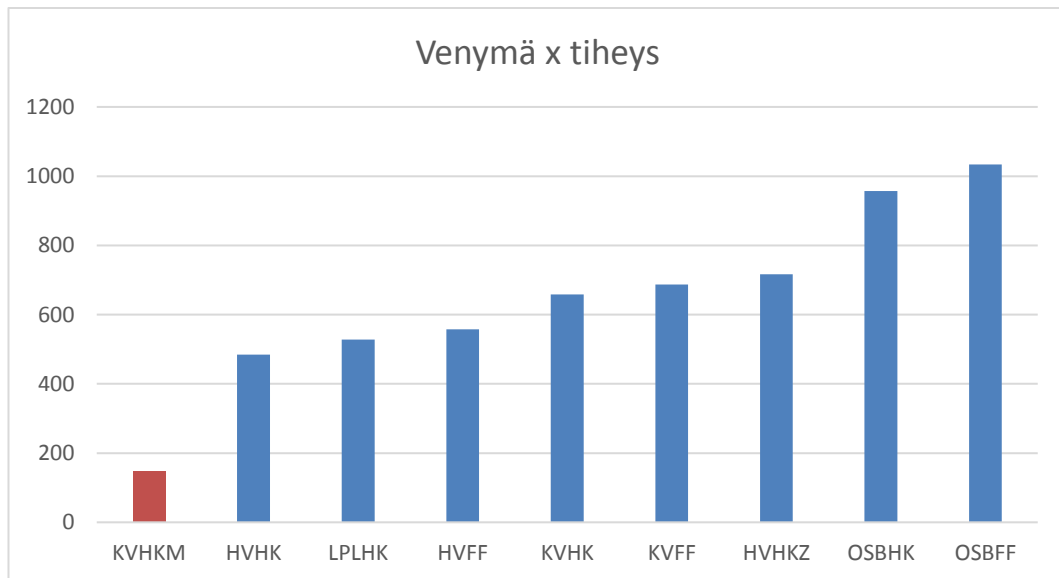
Kuva 23. Venymien keskiarvot eri rakenteille.

Venymien keskiarvot 1000 N kohdalla näkyvät kuvassa 23. Venymä 1000 N kohdalla on otettu tuloksiin mukaan, jotta tiedetään, kuinka paljon venymää syntyy, kun noin 100 kg kuorma asetetaan rakenteen päälle. Perinteisten rakenteiden kohdalla pienin venymä oli liimapuulevy-hunajakennorakenteella (2,16 mm) ja suurin OSB-levy-Finnfoam-rakenteella (3,64 mm). Monikerroksisen havuvanerihunajakennorakenteen venymä (0,82 mm) on selkeästi pienempi kuin perinteisillä rakenteilla.

Suurin keskihajonta on koivuvaneri-hunajakennorakenteella, jossa KVHK 1 koekappaleen heikot lujuusominaisuudet vaikuttavat keskiarvoon. KVHK 1 koekappaleen venymä 1000 N kohdalla oli 3,85 mm, kun keskiarvo oli 2,17 mm. Pienin hajonta oli koivuvaneri-Finnfoam-rakenteella. Monikerroksisen koivuvaneri-hunajakennorakenteen venymä on selvästi muita rakenteita pienempi, mutta se ei ole vertailukelpoinen muiden rakenteiden kanssa, koska KVHKM-rakenne on muita rakenteita selkeästi paksumpi.

Hunajakennesuhteet tarjosi testien perusteella pienemmän venymän kuin Finnfoam 1000 N voimalla. Koivuvanerilla venymä nousi 12 %, havuvanerilla 33 % ja OSB-levyllä 16 %.

Keskiarvoltaan alle 3 mm venymän saavutti 5 eri rakennetta. Ne olivat koivuvaneri-hunajakkenno-, havuvaneri-hunajakkenno-, liimapuulevy-hunajakkenno-, koivuvaneri-Finnfoam- sekä havuvaneri-hunajakennorakenteet (kohtisuora). OSB-levyjen venymä oli sekä hunajakennolla että Finnfoam-eristeellä yli 3 mm.

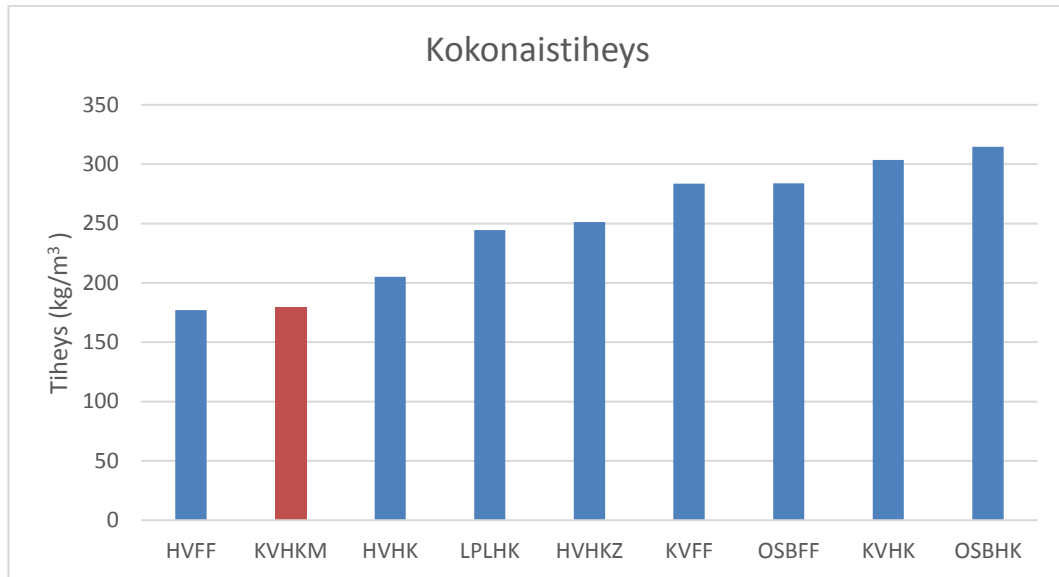


*Kuva 24. Venymän ja tiheyden suhde.*

Kuvasta 24 nähdään venymä ja tiheyden suhde. Venymän ja tiheyden kohdalla kumpikin suure nähdään hyväksi niiden ollessa pieniä. Tästä syystä verrattaessa venymää suhteessa tiheyteen, ne on kerrottu toisillaan ja mitä pienempi arvo saadaan sen parempi.

#### 4.6 Tiheys

Kuvasta 25 voi nähdä rakenteiden lopullisen keskitiheyden. Jokaisesta työssä käytetystä rakenteesta otettiin neljä koekappaletta punnitukseen ja niistä laskettiin keskiarvo.



*Kuva 25. Sandwich-rakenteiden lopulliset tiheydet.*

Perinteisistä rakenteista tihein oli OSB-levyn ja hunajakennolevyn yhdistelmällä, joka oli  $315 \text{ kg/m}^3$ . Kevein rakenne oli havuvaneri-Finnfoam-rakenne, jonka tiheys oli  $177 \text{ kg/m}^3$ . Monikerroksinen koivuvaneri-hunajakennorakenne oli vain hieman tiheämpi ( $179 \text{ kg/m}^3$ ) kuin HVFF-rakenne.

#### 4.7 Koivuvaneri ja hunajakkenno



*Kuva 26. Koivuvaneri-hunajakennorakenne.*

Koivuvaneri-hunajakennorakenne (Kuva 26) antoi testien parhaat kimmokerrointen arvot sekä toiseksi parhaat arvot maksivoimalle,

taivutuslujuudelle ja venymälle 1000 N voimalla. Kaiken kaikkiaan kyseinen rakenne oli odotetusti lujuusominaisuuksiltaan yksi parhaista.

Kokonaisneliöhinta koivuvaneri-hunajakennorakenteella oli 37,69 €/m<sup>2</sup>. Se oli työssä testatuista rakenteista toiseksi kallein. Rakenteen lopullinen tiheys oli myös toiseksi korkein.

#### 4.8 Havuvaneri ja hunajakkenno



*Kuva 27. Havuvaneri-hunajakennorakenne.*

Havuvaneri-hunajakennorakenne (Kuva 27) oli testeissä keskiluokkaa. Kimmokerroin oli 2484 MPa. Myös taivutuslujuus (5,1 MPa) ja maksimivoima (2611,4 N) olivat keskiluokkaa. Venymä 1000 N kohdalla oli testien kolmanneksi paras 2,36 mm.

Havuvaneri-hunajakennorakenteen neliöhinnaksi tuli 23,15 €/m<sup>2</sup>. Se on testien keskiluokkaa. Koivuvaneri- ja liimapuulevyrakenteet olivat kalliimpia ja muut rakenteet vain hieman edullisempia. Rakenteiden neliöhinnat löytyvät kuvasta 14. HVHK-rakenteen tiheys oli testien toiseksi alhaisin 205 kg/m<sup>3</sup>. Verrattaessa HVHK-rakenteen tiheyttä lujuusominaisuuksiin, pärjäsikin kyseinen rakenne hyvin vertailussa. Sillä oli paras tiheyden ja venymän suhde. Myös muut lujuusominaisuudet olivat hyviä suhteessa rakenteen tiheyteen.



#### 4.9 OSB-levy ja hunajakkenno



*Kuva 28. OSB-levy-hunajakennorakenne.*

OSB-levy-hunajakennorakenteen (Kuva 28) lujuusominaisuudet olivat odotetusti testien heikoimpia. Vain OSB-levy-Finnfoam-rakenteella oli heikommät lujuusominaisuudet ja 1000 N venymällä havuvaneri-Finnfoam-rakenteella oli suurempi venymä. OSBHK-rakenteiden keskihajonnat olivat kuitenkin suhteellisen pieniä mikä kertoo OSB-levyjen tasalaatuisuudesta.

OSB-levyt ovat kuitenkin edullisia ja OSBHK-rakenteen neliöhinta oli testien toiseksi alhaisin 17,65 €/m<sup>2</sup>. OSB-levy valittiin testeihin juuri sen edullisen hinnan takia. OSB-levyllä ei kuitenkaan valitettavasti ole kotimaisia valmistajia. OSBHK-rakenteen tiheys oli testien korkein 315 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.10 Liimapuulevy ja hunajakkenno



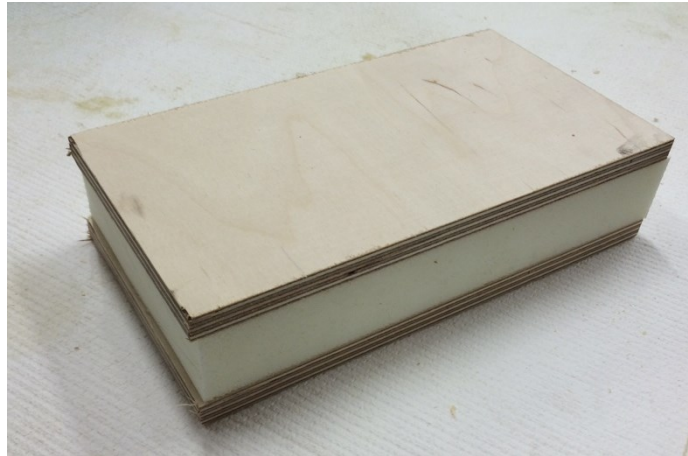
*Kuva 29. Liimapuulevy-hunajakennorakenne.*

Liimapuulevy-hunajakennorakenne (Kuva 29) oli lujuusominaisuuksiltaan yksi testien parhaista. 1000 N venymä sillä oli pienin 2,16 mm ja kimmokerroin sekä maksimivoima oli testien toiseksi parhaat. Taivutuslujuudessa OSBHK-rakenne (5,0 MPa) oli keskiluokkaa.

LPLHK-rakenne oli selvästi testien kallein. Sen neliöhinnaksi tuli 59,39 €/m<sup>2</sup>, joka on yli 20 €/m<sup>2</sup> kalliimpi kuin testien toiseksi kallein eli koivuvaneri-hunajakennorakenne. LPLHK-rakenteen kokonaistiheydeksi tuli 245 kg/m<sup>3</sup>. Tiheyttä ja maksivoimaa verrattaessa, oli LPLHK-rakenne testien paras. Myös muut lujuusominaisuudet suhteutettuna tiheyteen olivat hyviä.

Liimapuulevy-hunajakennorakenne on siis lujuusominaisuuksiltaan ja tiheydeltään erittäin hyvä ratkaisu, mutta se on selkeästi muita rakenteita kalliimpi.

#### **4.11 Koivuvaneri ja Finnfoam**

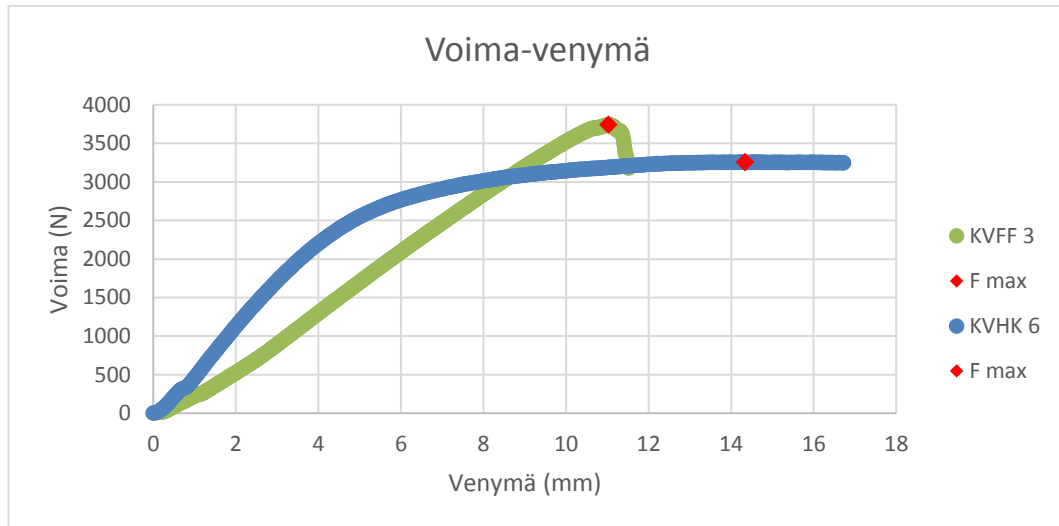


*Kuva 30. Koivuvaneri-Finnfoam-rakenne.*

Koivuvaneri-Finnfoam-rakenteella (Kuva 30) oli testien parhaat maksimivoima (3246,1 N) ja taivutuslujuus (6,5 MPa) tulokset. Tämä oli odotettu tulos koivuvanerin hyvien lujuusominaisuuksien takia sekä Finnfoam-välieristeen kovan rakenteen perusteella. KVFF-rakenteen kimmokerroin (2513 MPa) oli testien kolmanneksi paras, ja venymä 1000 N kohdalla (2,42 mm) oli Finnfoam-rakenteista paras. Kaikilla hunajakennorakenteilla venymä oli kuitenkin parempi.

Koivuvaneri-Finnfoam-rakenteen neliöhinnaksi tuli 34,63 €/m<sup>2</sup>. Se on testien kolmanneksi korkein ja selittyy koivuvanerin korkealla hinnalla. KVFF-rakenteen lopulliseksi tiheydeksi tuli 283 kg/m<sup>3</sup>, joka oli lähes sama kuin OSB-Finnfoam-rakenteella (284 kg/m<sup>3</sup>).

Kuvasta 31 voi nähdä KVFF 3 ja KVHK 6 koekappaleiden voima-venymäkäyrät. Huomattavaa on rakenteen käyttäytyminen maksimivoiman ylittymisen jälkeen. Finnfoam-eristeellä rakenne antaa periksi heti, kun taas hunajakenko eristeellä maksivoiman ylittyä, hunajakenko antaa vielä tukea rakenteelle eikä romahda saman tien. Tämä on tärkeä tieto ottaen huomioon rakenteen käytön lattia- ja kattomoduuleissa.



Kuva 31. KVFF 3 ja KVHK 6 koekappaleiden voima-venymäkäyrät.

#### 4.12 Havuvaneri ja Finnfoam



Kuva 32. Havuvaneri-Finnfoam-rakenne.

Havuvaneri-Finnfoam-rakenne (Kuva 32) antoi testien suurimmat kokonaishajonnat maksivoimalle ja taivutuslujuudelle. Tämä on ymmärrettävää, koska kyseinen rakenne tarjosi testien parhaat sekä heikoimmat tulokset maksimivoimalle ja taivutuslujuudelle. Harmillisesti HVFF-rakenteesta oli vain 4 koekappaletta, joten keskiarvojen laskeminen näistä ei vielä tarjoa todellista kuvaa rakenteen lujuusominaisuuksista. Suuri hajonta johtuu todennäköisesti havuvanerista, jossa oli vain 3 viilukerrosta. 3-kerroksisessa vanerissa oksien paikoilla oli suurempi vaikutus

lujuusominaisuuksiin kuin vanerissa, jossa on enemmän kerroksia. Työssä käytetty havuvaneri oli laatuluokitukseltaan III/III vaneria, jossa oksien sallittu määrä on kohtuullisen suuri. Vaikka koekappaleissa ei ollut suuria silmin nähtäviä eroja oksien määrässä, voi vaikutus olla huomattava oksan osuessa kriittiseen kohtaan.

Havuvaneri-Finnfoam-rakenne tarjosi siis testien parhaan yksittäisen maksimivoiman, joka oli kappaleella HVFF 3 (4766,3 N), sekä taivutuslujuuden, joka niin ikään oli kappaleella HVFF 3 (9,5 MPa). Myös testien heikoin yksittäinen koekappale oli havuvaneri-Finnfoam-rakenteella. Koekappaleen HVFF 1 maksimivoima oli 1336,8 N ja taivutuslujuus 2,7 MPa. Keskiarvallisesti KVFF-rakenteen maksimivoima oli kuitenkin keskiluokkaa kuten taivutuslujuuskin. Kimmokerroin oli pienin heti OSB-rakenteiden jälkeen (2161 MPa). Venymä 1000 N kohdalla oli toiseksi heikoin (3,15 mm) OSBFF-rakenteen jälkeen.

Havuvaneri-Finnfoam-rakenne oli kolmanneksi edullisin rakenne perinteisistä rakenteista. Neliöhinnaksi tuli 20,09 €/m<sup>2</sup>. HVFF-rakenteen kokonaistiheys oli testien pienin (177 kg/m<sup>3</sup>) ja ainoa joka oli alle 200 kg/m<sup>3</sup> perinteisistä rakenteista. Verrattaessa tiheyttä kimmokertoimeen ja taivutuslujuuteen, sai HVFF-rakenne selvästi parhaat tulokset. Hintansa ja painonsa puolesta HVFF on varteen otettava ratkaisu moduulirakenteeksi. Epätasaiset testitulokset ovat kuitenkin huomioitava. Tasaisempi rakenteen laatu olisi todennäköisesti saavutettavissa paremman laatuluokan omaavalla havuvanerilla. Esimerkiksi II/III laatuluokan havuvanerin hinta on 11,75 €/m<sup>2</sup>, kun testeissä käytetyn III/III luokan havuvanerin neliöhinta oli 7,51 €. Tulee myös muistaa, että Finnfoam-eriste ei täytä kestävä kehityksen periaatteita.

#### **4.13 OSB-levy ja Finnfoam**

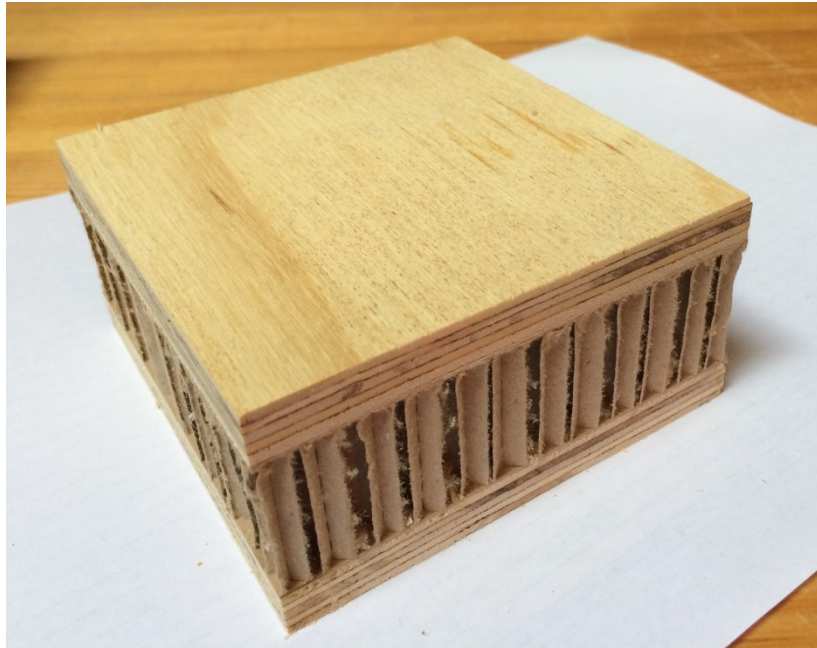


*Kuva 33. OSB-levy-Finnfoam-rakenne.*

OSB-levy-Finnfoam-rakenne (Kuva 33) oli lujuusominaisuuksiltaan testien heikoin. Tämä oli odotettavissa OSB-levyn ja Finnfoam-eristeen lujuusominaisuuksien valossa. OSBFF-rakenteella oli heikoin maksimivoima, kimmokerroin, taivutuslujuus sekä venymä 1000 N kohdalla. Testien perusteella tätä rakennetta ei voi suositella käytettäväksi, kun käyttökohde on tilaelementti, jonka tulee kestää jatkuvaa sekä vaihtuvaa kuormaa. Esimerkiksi venymä 1000 N kohdalla oli 3,64 mm kaikkien rakenteiden keskiarvon ollessa 2,17 mm.

Heikkojen lujuusominaisuuksien lisäksi OSBFF-rakenteen tiheys oli suhteellisen korkea ( $284 \text{ kg/m}^3$ ). Se on testien kolmanneksi tihein. Se on lähes sama kuin koivuvaneri-Finnfoam-rakenteella ( $283 \text{ kg/m}^3$ ), joka oli kuitenkin lujuusominaisuuksiltaan erittäin hyvä. Lujuusominaisuuksia verrattaessa tiheyteen OSBFF-rakenne oli jokaisessa ominaisuudessa heikoin. Parasta OSBFF-rakenteessa on sen neliöhinta. Se oli selkeästi edullisin neliöhinnan ollessa 14,59 € ja ainoa jonka neliöhinta oli alla 15 €.

#### **4.14 Havuvaneri ja hunajakenno (kohtisuora)**



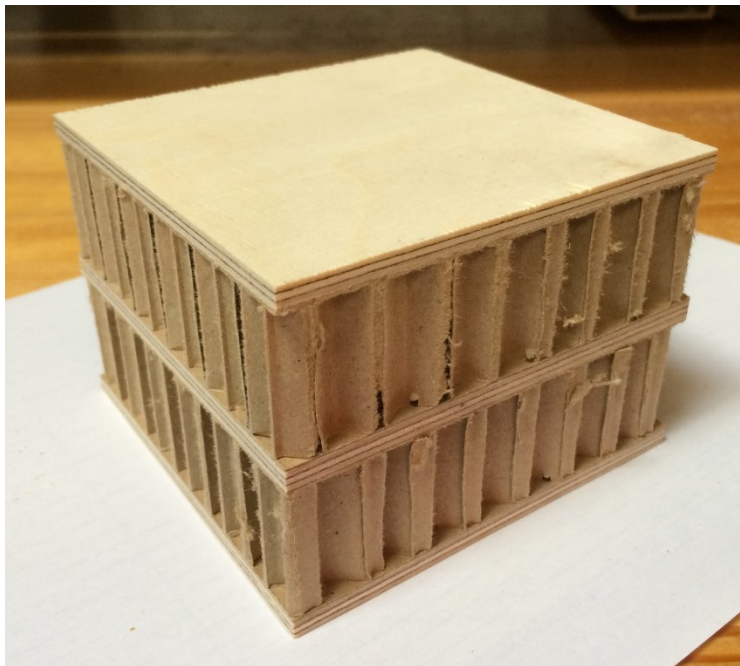
*Kuva 34. Havuvaneri-hunajakennorakenne (kohtisuora).*

Havuvaneri-hunajakennorakenne (Kuva 34), jossa pintaviilujen syysuunta oli kohtisuorassa rakenteen pituuden kanssa, haluttiin ottaa vertailuun testeihin, jotta pintaviilun syysuunnan merkitys selviäisi. Tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia HVHK-rakenteen kanssa, koska HVHKZ-rakenteet havuvaneri oli 5-kerroksisesta ja HVHK-rakenteen vaneri 3-kerroksista. Tuloksista käy kuitenkin selvästi ilmi, että syysuunnan ollessa kohtisuorassa lujuusominaisuudet ovat heikommat kuin syysuunnan ollessa yhdensuuntainen rakenteen pituuden kanssa. Syysuunnan merkitystä lujuusominaisuuksiin on tutkinut myös Kawasaki et al. (1999). Syysuunnan ollessa yhdensuuntainen rakenteen pituuden kanssa saatiin parempia lujuusominaisuuksia kuin syysuunnan ollessa kohtisuorassa (Kawasaki et al. 1999).

HVHKZ-rakenteen tiheys oli  $251 \text{ kg/m}^3$ , joka huomattavasti korkeampi kuin kohtisuoralla HVHK-rakenteella, jonka tiheys oli  $205 \text{ kg/m}^3$ . Tämä voi selittyä sillä, että 5-kerroksisessa havuvanerissa on useampi kerros, johon lisätään liimaa, ja tämä lisää myös vanerin kokonaispainoa. Kohtisuoran havuvaneri-hunajakennorakenteen neliöhinnaksi tuli 19,17 €.



#### 4.15 Monikerroksinen koivuvaneri ja hunajakakenno



*Kuva 35. Monikerroksinen koivuvaneri-hunajakakenno rakenne.*

Monikerroksisen koivuvaneri-hunajakennorakenteen (Kuva 35) kaikki tulokset eivät ole vertailukelpoisia muiden rakenteiden kanssa, koska KVHKM-rakenne oli selvästi muita rakenteita paksumpi. Sen paksuus oli 72 mm muiden rakenteiden paksuuden ollessa 48-52,7 mm. Paksuus johtuu siitä, että KVHKM-rakenteessa oli kaksi hunajakennokerrosta sekä kolme koivuvanerikerrosta. Tuloksista vertailukelpoisia ovat kimmokertoimen ja taivutuslujuuden tulokset. Nämä ovat vertailukelpoisia standardin EN 408 mukaan. Mainitsemisen arvoista on, että standardin perusteella 72 mm paksun rakenteen tulisi olla 1296 mm pitkä. Koekappaleet olivat kuitenkin vain 1200 mm pitkiä, mutta se on kuitenkin standardin sallimissa rajoissa ( $18h \pm 3h$ , Kuva 16). Maksimivoima ja venymä eivät huomioi rakenteen eri paksuutta, joten näiden tulokset eivät ole vertailukelpoisia. Huomioitavaa KVHKM-rakenteessa on, että 1000 N kohdalla tässä rakenteessa on tapahtunut huomattavasti vähemmän venymää kuin muissa rakenteissa.

Neliöhinta ( $50,76 \text{ €/m}^2$ ) KVHKM-rakenteella on korkeampi kuin muilla koivuvanerirakenteilla, mutta selvästi alhaisempi kuin



liimapuulevyrakenteella (59,39 €/m<sup>2</sup>). Korkeampi hinta muihin koivuvanerirakenteisiin verrattuna selittyy sillä, että KVHKM-rakenteessa koivuvanereita tuli 3 kerrosta, kun perinteisissä rakenteissa niitä tuli ainoastaan 2 kerrosta. Monikerroksisessa rakenteessa vanerilevyt olivat kuitenkin vain 4 mm paksuja, kun muissa rakenteissa ne olivat 9 mm. Näin ollen KVHKM-rakenteessa on jopa vähemmän koivuvaneria kuin KVHK- ja KVFF-rakenteissa. KVHKM-rakenteessa koivuvanerin yhteispaksuus on 12 mm, kun KVHK- ja KVFF-rakenteissa sitä on 18 mm. Tämä näkyy rakenteen tiheydessä, joka oli 179 kg/m<sup>3</sup>. Tämä on testien toiseksi alhaisin, vaikka rakenteessa on koivuvaneria ja hunajakennoa. Alhaisin kokonaistiheys oli HVFF-rakenteella, joka oli lähes sama 177 kg/m<sup>3</sup>.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Testeihin valikoitui ainoastaan kahta erilaista eristemateriaalia, jotka olivat hunajakennolevy ja Finnfoam-eriste. Näiden pohjalta saatiin kuitenkin hyviä testituloksia erilaisten pintamateriaalien johdosta. Pintamateriaaleja oli yhteensä kuutta erilaista, jotka olivat koivuvaneri (9 mm ja 4 mm), havuvaneri (3- ja 5-kerroksinen), liimapuulevy ja OSB-lastulevy.

Eristemateriaaleista hunajakennolevy osoittautui potentiaalisesti sandwich-rakenteen välimateriaaliksi. Se antoi testien perusteella hyviä ominaisuuksia sandwich-rakenteelle, ja sen valmistusmateriaali noudattaa myös kestävän kehityksen periaatteita. Hunajakennopahvi on helposti kierrätettävissä ja se valmistetaan uusiutuvista luonnonvaroista. Hunajakkenno tarjosi sandwichille vahvan ja sitkeän rakenteen. Kun eri rakenteet saavuttivat maksimivoiman 4-piste testissä, hunajakennorakenteet eivät sortuneet välittömästi, vaan hunajakkenno tarjosi tukea vielä tämänkin jälkeen. Finnfoam-rakenteet hajosivat saman tien maksimivoiman ylittyttyä. Finnfoam-eriste tarjosi kuitenkin koivu- ja havuvanerirakenteissa keskimäärin hieman paremman maksimivoiman ja kimmokertoimen, mutta venymä 1000 N kohdalla oli kaikilla Finnfoam-

rakenteilla suurempi kuin hunajakennorakenteilla. Finnfoam, vaikka onkin helposti uusiokäytettävissä ja kevyempää kuin hunajakenno, valmistetaan uusiutumattomista luonnonvaroista, joten työn tavoitteiden perusteella sitä ei voida suositella käytettäväksi sandwich-rakenteissa. Se haluttiin kuitenkin ottaa mukaan testeihin vertailumateriaaliksi. Koivuvanerin kohdalla hunajakenno tarjosi paremman kimmokertoimen ja venymän, kun Finnfoam oli parempi maksimivoimassa ja taivutuslujuudessa. Havuvanerin kanssa yhdistettynä tulokset olivat samat. OSB-lastulevyn kanssa hunajakenno tarjosi kaikissa lujuusmittauksissa paremmat ominaisuudet. Liimapuulevyn, kohtisuoran havuvanerin ja monikerroksisen koivuvanerin kanssa käytettiin vain hunajakennolevyjä, joten vertailua Finnfoam-eristeeseen ei ole.

Pintamateriaaleista heikoimmaksi osoittautui OSB-lastulevy, mikä oli odotettavissakin. Sen lujuusominaisuudet olivat heikoimmat lähes kaikissa mittauksissa etenkin suhteutettuna ne tiheyteen, eikä sillä ole suomalaisia tuottajia. OSB-lastulevy oli kuitenkin selvästi edullisin kaikista pintamateriaaleista. Muiden pintamateriaalien kanssa paremmuusjärjestys ei ole niin selkeä. Koivuvaneri tarjosi erittäin hyvät lujuusominaisuudet niin hunajakennon, että Finnfoamin kanssa, mutta suhteutettuna tiheyteen se häviää havuvanerirakenteille. Koivuvaneri on myös suhteellisen kallista ja se olikin testien toiseksi kallein materiaali. Vain liimapuulevy oli kalliimpaa. Liimapuulevyä jouduttiin ohentamaan testejä varten, jotta tulokset olisi vertailukelpoisia. Myös liimapuulevy tarjosi hyviä lujuusominaisuuksia, ja suhteutettuna tiheyteen se pärjasi testeissä hyvin. Tämän lisäksi liimapuulevy tarjoaa esteettisesti kauniin pinnan rakenteelle. Liimapuulevyn huonona puolena on sen kallis hinta. Liimapuulevy-hunajakennolevyrakente oli selkeästi testien kallein rakenne neliöhinnan ollessa 59,39 €/m<sup>2</sup>, kun toiseksi kallein perinteisistä rakenteista oli koivuvaneri-hunajakennolla 37,69 €/m<sup>2</sup>. Havuvaneri tarjosi myös hyviä lujuusominaisuuksia, mutta esimerkiksi havuvaneri-Finnfoam-rakenteessa oli suurta heittelyä maksimivoiman ja taivutuslujuuden kohdalla. Heittely saattoi johtua havuvanerin heikosta laadusta (III/III), jossa on sallittu suuri

määrä oksia. Hunajakennon kohdalla heittely ei ollut niin suurta, mutta lujuusominaisuudetkaan eivät olleet aivan yhtä hyvät kuin koivuvanerilla ja liimapuulevyllä. Havuvaneri pärjasi vertailussa hyvin, kun ottaa huomioon sen tiheyden, eikä sen neliöhintakaan noussut kovin korkeaksi (HVHK 23,15 €/m<sup>2</sup>, HVFF 20,09 €/m<sup>2</sup>).

Havuvaneri-hunajakennorakenne oli ainoa, jossa testattiin myös pintaviilun syysuunnan merkitystä. Testeissä oli sandwich-rakenteen pituuden kanssa yhdensuuntainen ja kohtisuorainen havuvaneri. Verrattaessa kohtisuoraa syysuuntaa yhdensuuntaiseen nousi maksimivoima 15 %, kimmokerroin 13 % ja taivutuslujuus 16 %. Venymä 1000 N kohdalla väheni 17 %. Tulokset eivät ole kuitenkaan täysin vertailukelpoisia, koska yhdensuuntainen havuvaneri oli 3-kerroksinen ja kohtisuorainen oli 5-kerroksinen, mutta ne ovat kuitenkin suuntaa antavia. Verrattaessa lujuusominaisuuksia tiheyteen ei kohtisuorainen rakenne ollut kovinkaan hyvä verrattuna muihin rakenteisiin.

Testeissä oli myös yksi muita rakenteita selvästi paksumpi koivuvaneri-hunajakennorakenne. Tässä rakenteessa oli yhteensä 5 kerrosta. Pintalevyt ja keskellä oleva levy olivat 4 mm paksua koivuvaneria, ja näiden välissä oli 2 hunajakennolevyä, jotka olivat 30 mm paksuja. Koivuvaneria tuli siis yhteensä 12 millimetrin verran, kun sitä KVHK-rakenteessa oli 18 mm. Testeissä saadut tulokset eivät kaikki ole vertailukelpoisia, koska rakenne on muita rakenteita paksumpi. Huomattavaa on kuitenkin se, että venymä 1000 N kohdalla on yli 2 kertaa pienempi kuin testien toiseksi paras tulos, joka oli LPLHK-rakenteen 2,16 mm, kun se tällä rakenteella oli 0,82 mm. KVHKM-rakenteen tiheys oli erittäin kilpailukykyinen muihin rakenteisiin verrattuna, vaikka sen paksuus oli huomattavasti suurempi kuin muilla rakenteilla. Sen tiheys oli kaikista rakenteista toiseksi pienin 179 kg/m<sup>3</sup>.

Tässä työssä testatuista rakenteista 4 rakennetta voisi olla mahdollisia rakenteita käytettäväksi tilaelementeissä. Ne olivat KVHK-, HVHK-, LPLHK- ja KVHKM-rakenteet. Näiden rakenteiden lujuusominaisuudet olivat hyviä ja

niissä käytetyt materiaalit noudattavat kestävänsä kehityksen periaatteita. Koivuvaneri ja liimapuulevy tarjoavat hyviä lujuusominaisuuksia, mutta ne ovat melko kalliita ja raskaita materiaaleja verrattuna havuvaneriin. Havuvaneri taas on selvästi edullisempaa ja kevyempää, mutta ei tarjoa aivan niin hyviä lujuusominaisuuksia. Tämän voisi korjata käyttämällä hieman parempilaatuista havuvaneria, jolloin lujuusominaisuudet todennäköisesti paransivat rakenteen silti pysyessä kevyenä. Rakenteen hinta tietysti nousisi, mutta se olisi silti edullisempi kuin koivuvaneri- ja liimapuulevyrakenteilla. Monikerroksisia rakenteita tässä työssä oli vain 1 kappale, ja se antoi lupaavia tuloksia. Näin ollen hyvälaatuisesta havuvanerista tehty monikerroksinen sandwich-rakenne olisi tutkimisen arvoinen rakenne, joka voisi tarjota hyviä lujuusominaisuuksia, kevyttä rakennetta ja edullista hintaa.

## LÄHDELUETTELO

Bekisli, B. & Grenestedt, J.L. 2004, "Experimental evaluation of a balsa sandwich core with improved shear properties", *Composites Science and Technology*, vol. 64, no. 5, pp. 667-674.

Chitchumnong, P., Brooks, S.C. & Stafford, G.D. 1989, "Comparison of three- and four-point flexural strength testing of denture-base polymers", *Dental Materials*, vol. 5, no. 1, pp. 2-5.

Eltete Transport Packaging Solutions 2015, Tuotteet [Online]. [Viitattu: 15.12.2015]. Hunajakennolevy. Saatavilla: <http://fi.eltetepm.com/hunajakennolevy.html>

Emport, Tuotteet [Online]. [Viitattu: 15.12.2015]. MDF-Levyt. Saatavilla: <http://www.emport.fi/fi/tuotteet/levytuotteet/mdf-levyt.html>

Finnfoam Oy, Tuotteet [Online]. [Viitattu 29.8.2016]. Levyjen mitat ja tyypit. Saatavilla: <http://www.finnfoam.fi/tuotteet/finnfoam-eristelevyt/levyn-mitat-ja-tyypit/>

Forest Products Laboratory. 2010. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Genetrade Wood Products Oy, Tuotteet [Online]. [Viitattu 18.2.2016]. OSB-levyt. Saatavilla: [http://www.genetrade.net/doc/Yleiset\\_tekniset\\_ominaisuudet\\_OSB\\_3\\_ja\\_OSB\\_4.pdf](http://www.genetrade.net/doc/Yleiset_tekniset_ominaisuudet_OSB_3_ja_OSB_4.pdf)

He, M. & Hu, W. 2008, "A study on composite honeycomb sandwich panel structure", *Materials and Design*, vol. 29, no. 3, pp. 709-713.

Kawasaki, T. 1999, "Sandwich panel of veneer-overlaid low-density fiberboard", *Journal of Wood Science*, vol. 45, no. 4, pp. 291-298.

Kawasaki, T., Zhang, M., Wang, Q., Komatsu, K. & Kawai, S. 2006a, "Elastic moduli and stiffness optimization in four-point bending of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors", *Journal of Wood Science*, vol. 52, no. 4, pp. 302-310.

Kawasaki, T. & Kawai, S. 2006b, "Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors", *Journal of Wood Science*, vol. 52, no. 1, pp. 75-83.

Kiintopuu, Mikä CLT? Perustietoa CLT:stä [Online]. Saatavilla: <http://www.kiintopuu.fi/fi/etusivu/mika-clt-perustietoa-cltsta.html>

Klímek, P., Wimmer, R., Brabec, M. & Sebera, V. 2016, "Novel sandwich panel with interlocking plywood kagome lattice core and grooved particleboard facings", *BioResources*, vol. 11, no. 1, pp. 195-208.

K-Rauta, Tuotteet [Online]. [Viitattu: 15.12.2015]. OSB-levyt. Saatavilla: <https://www.k-rauta.fi/rautakauppa/osb-3-levy-11x2600x1200mm>

Lakreb, N., Bezzazi, B. & Pereira, H. 2015, "Mechanical behavior of multilayered sandwich panels of wood veneer and a core of cork agglomerates", *Materials and Design*, vol. 65, pp. 627-636.

Mamalis, A.G., Spentzas, K.N., Pantelelis, N.G., Manolakos, D.E. & Ioannidis, M.B. 2008, "A new hybrid concept for sandwich structures", *Composite Structures*, vol. 83, no. 4, pp. 335-340.

McBride, S.L. 2009. Insulation: EPS and XPS [Online]. [Viitattu: 18.8.2016]. Saatavilla: <http://www.buildings.com/article-details/articleid/8498/title/insulation-eps-and-xps.aspx>

Metsäteollisuus Ry. 2005. Vanerikäsikirja.

Mujika, F. 2006, "On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests", *Polymer Testing*, vol. 25, no. 2, pp. 214-220.

Oy Kohiwood Ltd, Tuotteet [Online]. [Viitattu: 15.12.2015]. Laatutuotteet kalustevalmistajille. Saatavilla: [http://www.kohiwood.fi/fi/laatutuotteet\\_kalustevalmistajille/?id=29](http://www.kohiwood.fi/fi/laatutuotteet_kalustevalmistajille/?id=29)

Puuinfo Oy, Puutieto [Online]. [Viitattu: 23.8.2016]. Saatavilla: [http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/rakennesahatavara/pohjoismaisen\\_havupuun\\_tekniset\\_ominaisuudet.pdf](http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/rakennesahatavara/pohjoismaisen_havupuun_tekniset_ominaisuudet.pdf)

Reis, L. & Silva, A. 2009, "Mechanical behavior of sandwich structures using natural cork agglomerates as core materials", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 11, no. 6, pp. 487-500.

Shalbafan, A., Luedtke, J., Welling, J. & Thoemen, H. 2012, "Comparison of foam core materials in innovative lightweight wood-based panels", *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 70, no. 1-3, pp. 287-292.

Shivakumar, K.N., Argade, S.D., Sadler, R.L., Sharpe, M.M., Dunn, L., Swaminathan, G. & Sorathia, U. 2006, "Processing and properties of a lightweight fire resistant core material for sandwich structures", *Journal of Advanced Materials*, vol. 38, no. 1, pp. 32-38.

Srivaro, S., Chaowana, P., Matan, N. & Kyokong, B. 2014, "Lightweight sandwich panel from oil palm wood core and rubberwood veneer face", *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 26, no. 1, pp. 50-57.

Srivaro, S., Matan, N. & Lam, F. 2015, "Stiffness and strength of oil palm wood core sandwich panel under center point bending", *Materials and Design*, vol. 84, pp. 154-162.

Stora Enso 2013, Tuote [Online]. [Viitattu 17.8.2016]. CLT-Cross Laminated Timber. Saatavilla: <http://www.clt.info/fi/tuote/>

Suomen Kuitulevy Oy, Rakennuslevyt [Online]. [Viitattu: 15.12.2015]. Rakentajan kovalevy. Saatavilla: <http://www.kuitulevy.fi/fi/rakennuslevyt/rakentajankovalevy>

Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. 2015. Liimapuukäsikirja, Osa 2. ISBN 978-952-99868-6-6.

Wisa-plywood 2015, Products [Online]. [Viitattu: 15.12.2015]. Wisa-Birch. Saatavilla: <http://www.wisaplywood.com/Products/product-catalogue/wisa-birch/Pages/default.aspx>

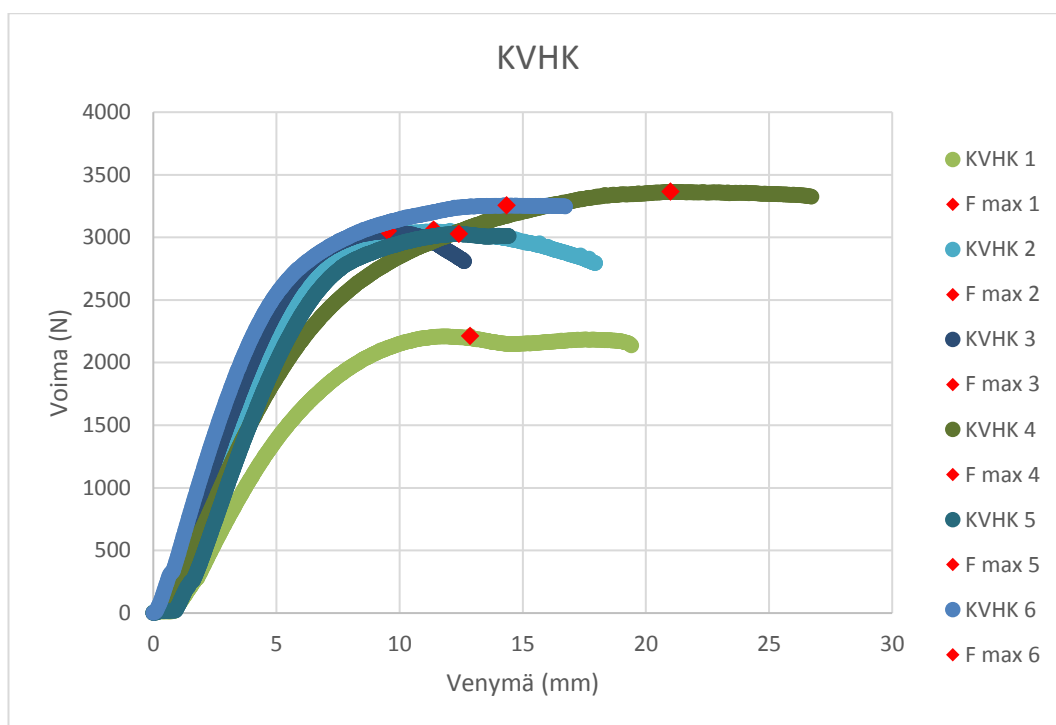
## **LIITTEET**

Liite 1. Sandwich-rakenteiden voima-venymäkäyrät

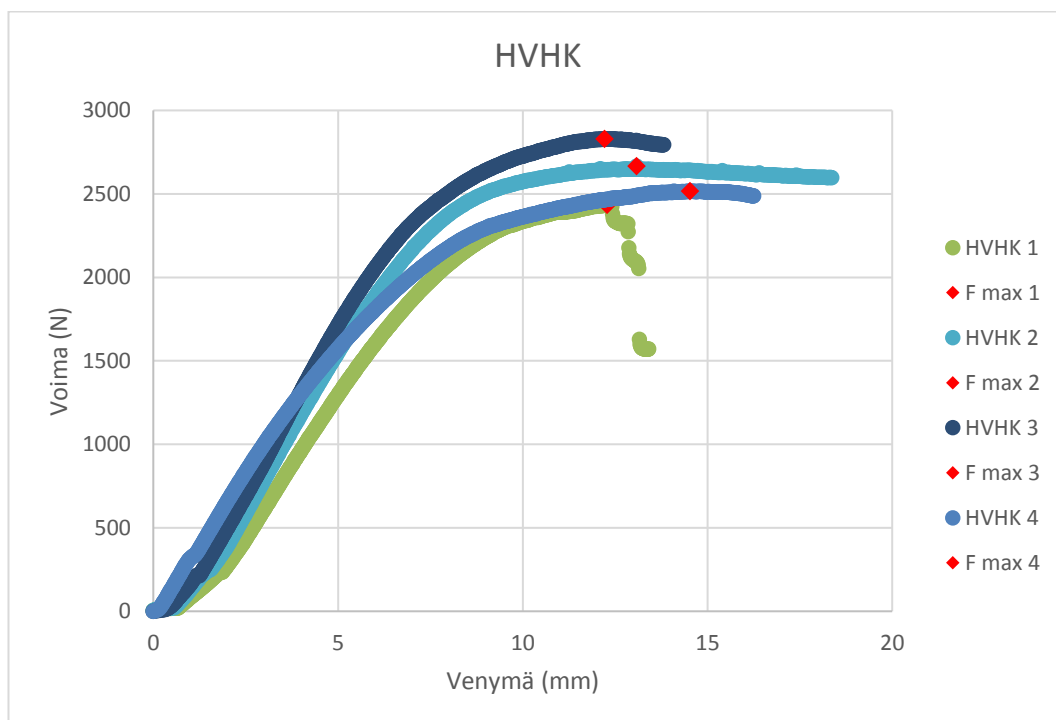
Liite 2. Lujuustestien tulokset



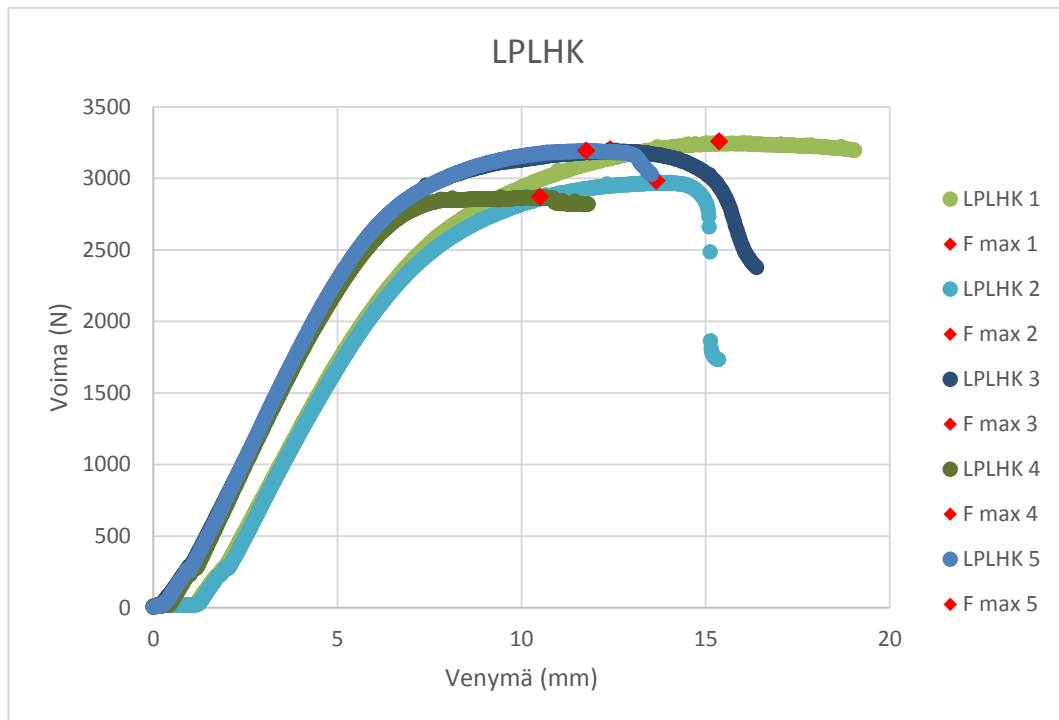
Liite 1. Sandwich-rakenteiden voima-venymäkäyrät



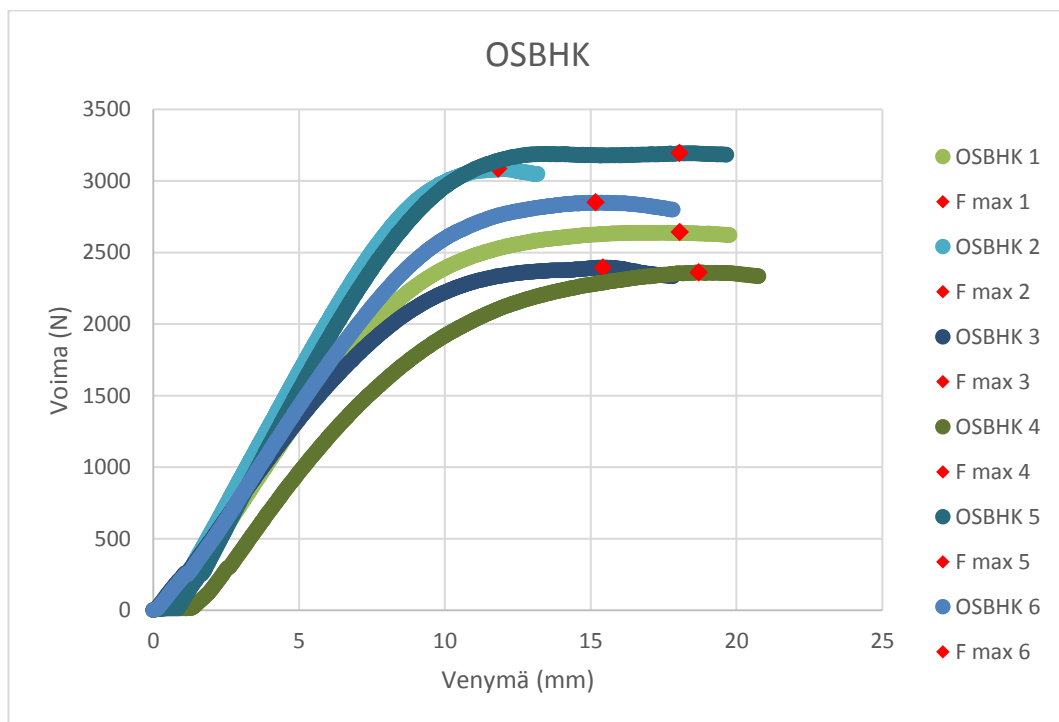
Kuva 36. Koivuvaneri-hunajakenno voima-venymäkäyrät.



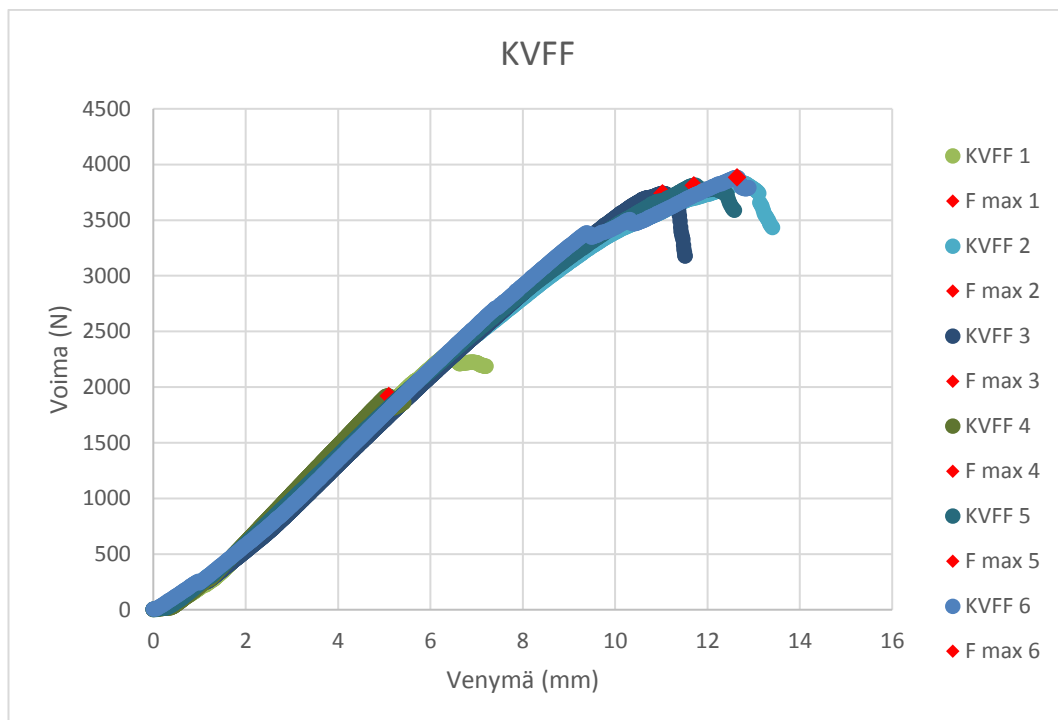
Kuva 37. Havuvaneri-hunajakenno voima-venymäkäyrät.



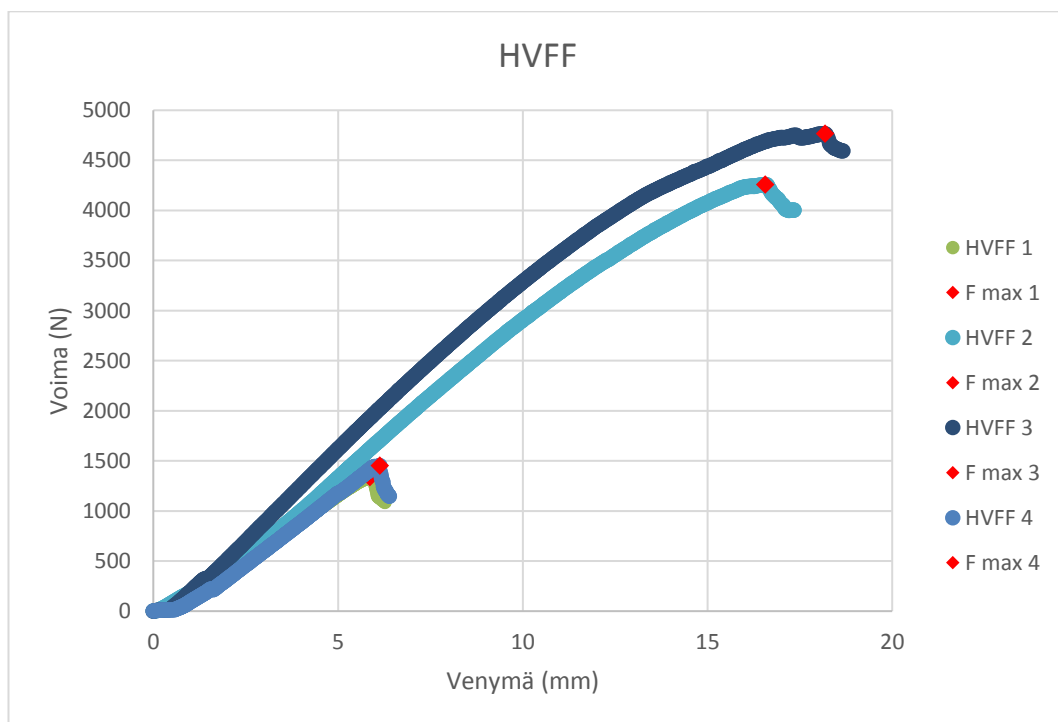
Kuva 38. Liimapuulevy-hunajakenno voima-venymäkäyrät.



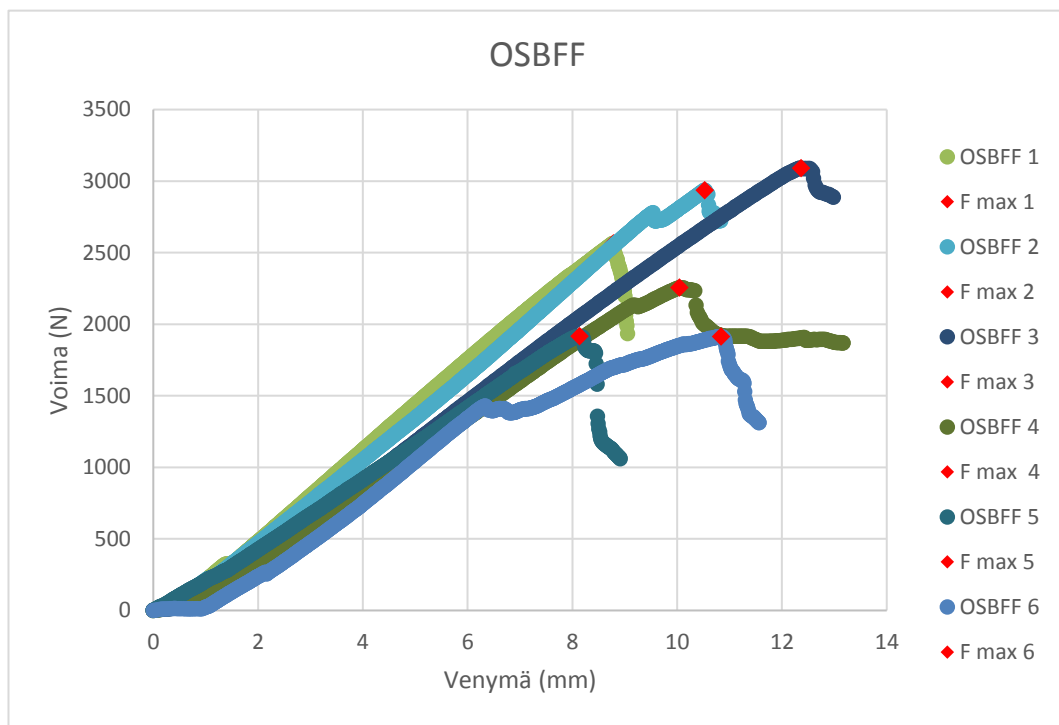
Kuva 39. OSB-hunajakenno voima-venymäkäyrät.



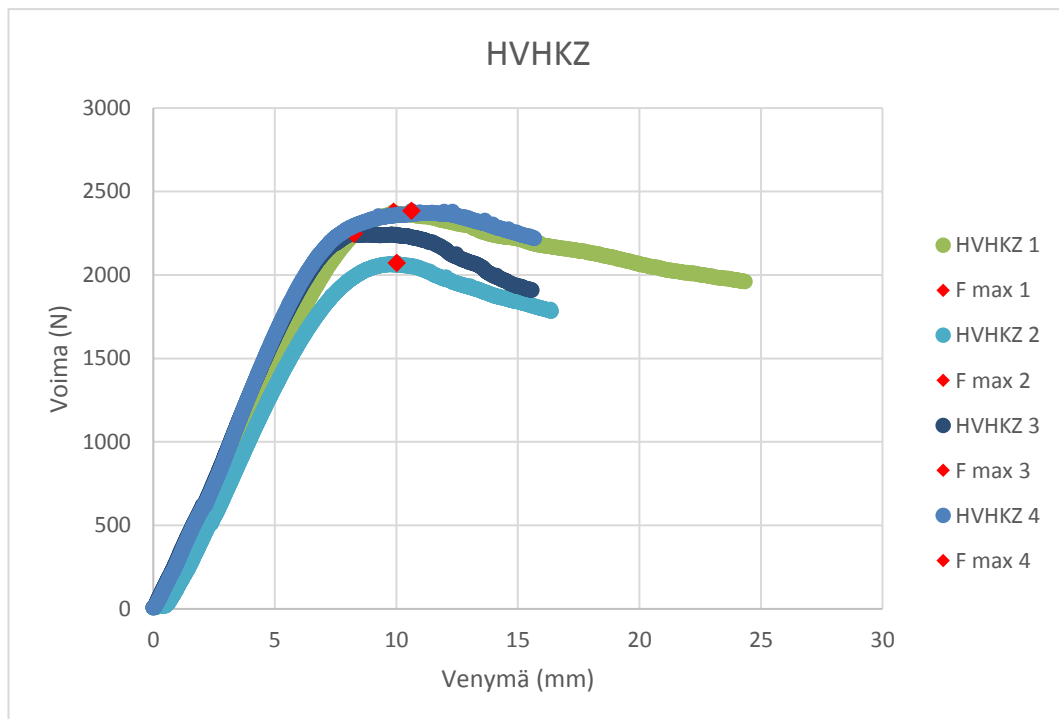
Kuva 40. Koivuvaneri-Finnfoam voima-venymäkäyrät.



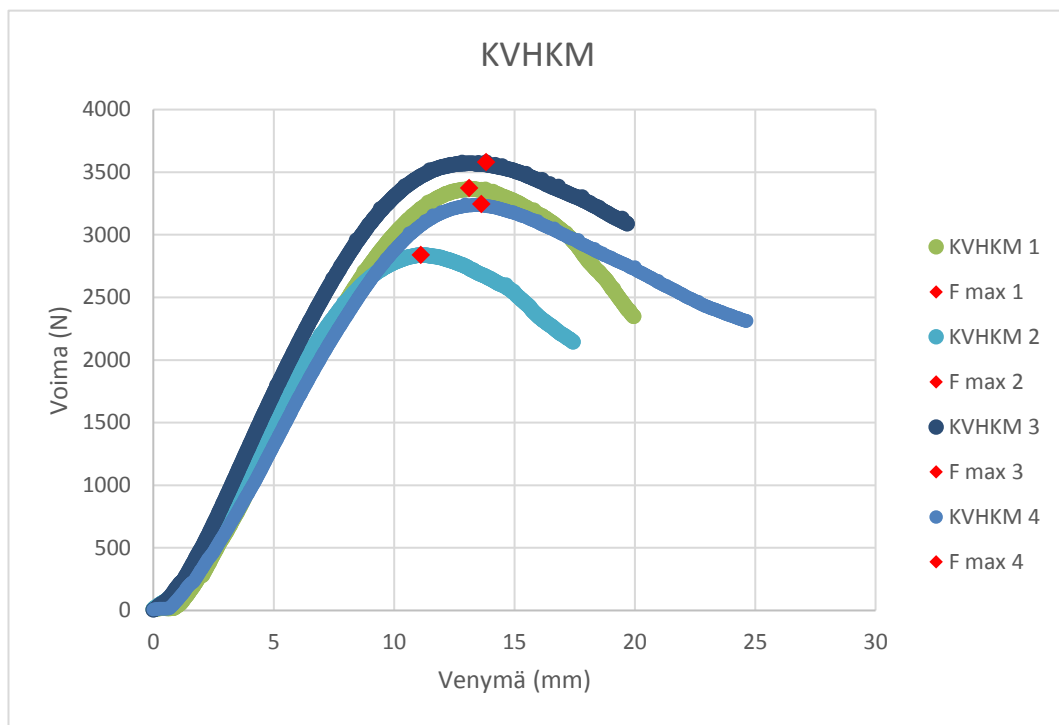
Kuva 41. Havuvaneri-Finnfoam voima-venymäkäyrät.



Kuva 42. OSB-levy-Fininfoam voimavenymäkäyrät.



Kuva 43. Havuvaneri-hunajakenno (kohtisuora) voima-venymäkäyrät.



Kuva 44. Monikerroksinen koivuvaneri-hunajakkenno voima-venymäkäyrät.

## Liite 2. Lujuustestien tulokset

*Taulukko 2. Kaikkien koekappaleiden tulokset.*

Rakenne	Leveys (mm)	Paksuus (mm)	18h (mm)	6h (mm)	Koekappale	F max (N)	Kimmokerroin (Mpa)	Taivutuslujuus (Mpa)	1000 N venymä (mm)	Tiheys (kg/m3)
KVHK	175	48	864	288	KVHK 1	2212,1	2513	4,7	3,85	
	195	48	864	288	KVHK 2	3061,3	3263	5,9	2,40	
	188	48	864	288	KVHK 3	3053,0	3979	6,1	1,65	
	188	48	864	288	KVHK 4	3367,1	2968	6,7	1,94	
	188	48	864	288	KVHK 5	3029,4	3732	6,0	1,70	
	188	48	864	288	KVHK 6	3256,6	4282	6,5	1,47	
					<b>KVHK Keskiarvo</b>	<b>2996,6</b>	<b>3456</b>	<b>6,0</b>	<b>2,17</b>	<b>303,67</b>
HVHK	195	48	864	288	HVHK 1	2433,8	2211	4,7	3,02	
	195	48	864	288	HVHK 2	2665,7	2535	5,1	1,79	
	188	48	864	288	HVHK 3	2830,1	2852	5,6	1,99	
	188	48	864	288	HVHK 4	2516,1	2337	5,0	2,64	
					<b>HVHK Keskiarvo</b>	<b>2611,4</b>	<b>2484</b>	<b>5,1</b>	<b>2,36</b>	<b>205,17</b>
LPLHK	200	52,7	948,6	316,2	LPLHK 1	3258,7	3120	5,6	2,07	
	200	52,7	948,6	316,2	LPLHK 2	2983,2	3064	5,1	3,09	
	190	52,7	948,6	316,2	LPLHK 3	3203,2	3145	5,8	1,52	
	190	52,7	948,6	316,2	LPLHK 4	2871,6	3217	5,2	2,46	
	200	52,7	948,6	316,2	LPLHK 5	3192,8	3317	5,5	1,65	
					<b>LPLHK Keskiarvo</b>	<b>3101,9</b>	<b>3172</b>	<b>5,4</b>	<b>2,16</b>	<b>244,53</b>
OSBHK	188	52,7	948,6	316,2	OSBHK 1	2642,2	2252	4,8	3,05	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBHK 2	3084,5	2396	5,6	2,63	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBHK 3	2394,4	1868	4,4	3,40	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBHK 4	2360,3	1848	4,3	3,59	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBHK 5	3194,1	2487	5,8	2,47	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBHK 6	2849,5	1974	5,2	3,12	
					<b>OSBHK Keskiarvo</b>	<b>2754,2</b>	<b>2138</b>	<b>5,0</b>	<b>3,04</b>	<b>314,56</b>
KVFF	188	48	864	288	KVFF 1	2286,4	2587	4,6	2,46	
	188	48	864	288	KVFF 2	3835,0	2447	7,6	2,61	
	188	48	864	288	KVFF 3	3740,9	2495	7,5	2,51	
	188	48	864	288	KVFF 4	1918,7	2704	3,8	2,40	
	188	48	864	288	KVFF 5	3811,9	2317	7,6	2,43	
	188	48	864	288	KVFF 6	3884,0	2530	7,7	2,14	
					<b>KVFF Keskiarvo</b>	<b>3246,1</b>	<b>2513</b>	<b>6,5</b>	<b>2,42</b>	<b>283,49</b>
HVFF	188	48	864	288	HVFF 1	1336,8	1866	2,7	3,80	
	188	48	864	288	HVFF 2	4260,0	2136	8,5	3,10	
	188	48	864	288	HVFF 3	4766,3	2313	9,5	2,86	
	188	48	864	288	HVFF 4	1453,6	2330	2,9	2,84	
					<b>HVFF Keskiarvo</b>	<b>2954,2</b>	<b>2161</b>	<b>5,9</b>	<b>3,15</b>	<b>177,07</b>
OSBFF	188	52,7	948,6	316,2	OSBFF 1	2566,3	1969	4,7	3,43	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBFF 2	2936,8	2007	5,3	3,26	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBFF 3	3091,3	1713	5,6	4,08	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBFF 4	2255,7	1596	4,1	4,00	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBFF 5	1916,4	1852	3,5	3,55	
	188	52,7	948,6	316,2	OSBFF 6	1913,5	1908	3,5	3,54	
					<b>OSBFF Keskiarvo</b>	<b>2446,7</b>	<b>1841</b>	<b>4,4</b>	<b>3,64</b>	<b>283,75</b>
HVHKZ	192	48	864	288	HVHKZ 1	2380,2	1863	4,6	3,05	
	192	48	864	288	HVHKZ 2	2073,3	2095	4,0	3,11	
	192	48	864	288	HVHKZ 3	2247,9	2442	4,4	2,57	
	192	48	864	288	HVHKZ 4	2385,3	2396	4,7	2,67	
					<b>HVHKZ Keskiarvo</b>	<b>2271,7</b>	<b>2199</b>	<b>4,4</b>	<b>2,85</b>	<b>251,19</b>
KVHKM	200	72	1296 (1200)	432	KVHKM 1	3374,5	2449	4,2	0,88	
	200	72	1296 (1200)	432	KVHKM 2	2839,5	2293	3,5	1,11	
	200	72	1296 (1200)	432	KVHKM 3	3582,0	2880	4,5	0,96	
	200	72	1296 (1200)	432	KVHKM 4	3247,2	2387	4,1	0,35	
					<b>1200 KVHKM Keskiarvo</b>	<b>3260,8</b>	<b>2502</b>	<b>4,1</b>	<b>0,82</b>	<b>179,34</b>